



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Физико-технологический институт

А. Ф. ЗАЦЕПИН

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

А. Ф. ЗАЦЕПИН

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ
для студентов, обучающихся
по направлению подготовки «Приборостроение»

*Под редакцией члена-корреспондента РАН, профессора,
доктора технических наук В. Е. Щербинина*

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2016

УДК 620.179.16(075.8)

ББК 34.204.013.2я73

3-38

Рецензенты: Урал. гос. лесотехн. ун-т (завкафедрой профессор, доктор физико-математических наук *М. П. Кащенко*); доктор технических наук, профессор *Г. Л. Аккерман* (Урал. гос. ун-т путей сообщений)

Изображение на обложке — из архива автора.

Зацепин, А. Ф.

З-38 Акустический контроль : учебное пособие / А. Ф. Зацепин ; под ред. чл.-кор. РАН, проф., д-ра техн. наук В. Е. Щербинина. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 211,[1] с.
ISBN 978-5-7996-1818-6

Изложены теоретические и практические основы важнейших методов акустического контроля. Рассмотрены физические принципы генерации и приема ультразвука, методы расчета акустических полей, метрологические аспекты ультразвуковой дефектоскопии. Особое внимание уделено анализу волновых явлений в акустическом контроле, а также устройству и технологии применения современных типов УЗ-дефектоскопов. В приложении приведены термины и определения акустического контроля.

Библиогр.: 8 назв. Табл. 9. Рис. 122.

УДК 620.179.16(075.8)

ББК 34.204.013.2я73

ISBN 978-5-7996-1818-6

© Уральский федеральный
университет, 2016

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АК	— акустический контроль
АРД	— амплитуда — расстояние — диаметр
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
АЭ	— акустическая эмиссия
ВРЧ	— временная регулировка чувствительности
НК	— неразрушающий контроль
ОК	— объект контроля
ПЭП	— пьезоэлектрический преобразователь
СО	— стандартный образец
СОП	— стандартный образец предприятия
УЗ	— ультразвук
УЗК	— ультразвуковые колебания
ФЧХ	— фазочастотная характеристика
ЭМА	— электромагнитно-акустический
ЭМАП	— электромагнитно-акустическое преобразование
$I_{\text{и}}$	— поле излучения
$I_{\text{п}}$	— поле приемника
$K_{\text{и}}$	— коэффициент излучения
$K_{\text{п}}$	— коэффициент приема
$K_{\text{ип}}$	— коэффициент двойного преобразования
$K_{\text{выяв}}$	— коэффициент выявляемости дефектов
P	— акустическое давление
$x_{\text{б}}$	— размер ближней зоны
Z	— акустический импеданс
$Z_{\text{м}}$	— механический импеданс
δ	— коэффициент затухания УЗК

...Все божественные слова в волнах...

Нострадамус

ВВЕДЕНИЕ

.....

В настоящее время в различных отраслях промышленности находит широкое применение ультразвуковая дефектоскопия. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля она обладает важными преимуществами: имеет высокую чувствительность к наиболее опасным внутренним дефектам типа трещин, инородных включений и других нарушений сплошности материала, характеризуется большой производительностью, обеспечивает возможность проведения процедуры контроля непосредственно на рабочих местах без прерывания технологического процесса. Ультразвуковые методы контроля позволяют при низких экономических затратах получать достоверную информацию о характере дефектов, расположенных на значительной глубине в материалах, конструкциях, сварных соединениях и других промышленных объектах.

В данной книге рассмотрены явления излучения, приема, распространения, отражения, преломления и дифракции акустических волн; приведены методы ультразвукового контроля. Указанные в книге вопросы рассматриваются прежде всего с точки зрения задач, решаемых при проектировании специализированной аппаратуры и развитии технологии УЗ-дефектоскопии.

1. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Акустическими методами называют методы контроля, основанные на применении упругих колебаний и волн в контролируемом объекте. Одна из основных причин широкого распространения акустических методов заключается в том, что свойства материалов, определяющие возбуждение и распространение механических колебаний, тесно связаны с прочностными характеристиками. В связи с этим основными задачами методов акустического неразрушающего контроля являются:

- выявление дефектов типа нарушения сплошности;
- оценка геометрических параметров изделий;
- оценка физико-химических параметров изделий или механических свойств материала.

1.1. Классификационная система

В соответствие с ГОСТ 18353—79 все методы НК классифицируются по следующим признакам:

1) по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом. Под характером взаимодействия физического поля или вещества с ОК подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом, но не с проникающим веществом;

2) по первичному информативному параметру. Под первичным информативным параметром подразумевается одна из основных характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с ОК;

3) по способу получения первичной информации. Под первичной информацией подразумевается совокупность характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с ОК.

На рис. 1.1 приведена классификационная схема акустических методов НК по ГОСТ 18353–79. Согласно ГОСТ 23829–79 акустические методы подразделяются на две большие группы. Одна из них использует излучение и прием акустических колебаний и волн (*активные методы*), вторая — только прием колебаний и волн (*пассивные методы*). Колебания в последнем случае возбуждаются под действием процессов, происходящих в самом ОК. В каждой из этих групп можно выделить методы, основанные на возникновении в ОК бегущих и стоячих волн или колебаний, (рис. 1.2).



Рис. 1.1. Классификация акустических методов контроля по ГОСТ 18353–79

Активные акустические методы, в которых применяют бегущие волны, делят на подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение.

К пассивным методам относят акустико-эмиссионный метод, в котором используют бегущие волны. Явление акустической эмиссии (от лат. *emissio* — испускание, излучение) состоит в излучении упругих волн материалом ОК в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры.

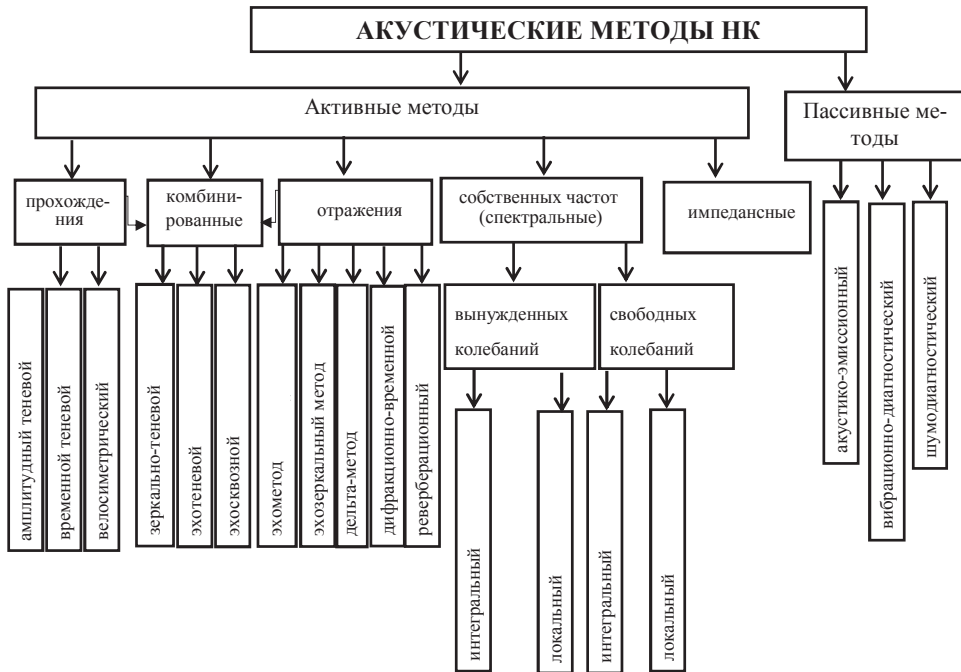


Рис. 1.2. Классификация акустических методов контроля и диагностики по ГОСТ 23829–79

К пассивным методам относят также вибрационно-диагностический и шумодиагностический. В первом из них анализируют параметры вибрации какой-либо отдельной детали или узла с помощью приемников контактного типа. Во втором изучают спектр шумов работающего механизма в целом на слух или с помощью микрофонных и других приемников и приборов-анализаторов спектра.

При использовании методов колебаний возбуждают свободные или вынужденные колебания либо ОК в целом (интегральные методы), либо его части (локальные методы). Свободные колебания возбуждают путем кратковременного внешнего воздействия на ОК, вынужденные колебания предполагают постоянную связь колеблющегося ОК с возбуждающим генератором, частоту которого изменяют. Измеряемыми величинами служат частоты свободных колебаний либо резонансов вынужденных колебаний.

Функциональные схемы вышеуказанных методов акустического контроля рассмотрены в последующих параграфах.

1.2. Методы прохождения

Методы прохождения основаны на возбуждении в изделии упругой волны и анализе свойств волн, прошедших через ОК. Методы прохождения предполагают наличие двух преобразователей — излучающего и приемного, расположенных по разные стороны от ОК или контролируемого его участка. В некоторых случаях преобразователи размещают с одной стороны от ОК на определенном расстоянии друг от друга. Информацию получают, измеряя параметры прошедшего от излучателя к приемнику сквозного сигнала. К этой подгруппе относят следующие методы: амплитудный теневой, временной теневой и велосиметрический.

1.2.1. Амплитудный теневой метод

Теневой метод основан на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны (так называемого сквозного сигнала) под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень. Функциональная схема метода приведена на рис. 1.3.

Акустические колебания вводятся в контролируемое изделие при помощи электроакустического преобразователя 1. Прошедшие через изделие акустические сигналы поступают на приемный преобразователь 2, расположенный с противоположной стороны изделия симметрично излучающему преобразователю. Далее сигнал подается на вход приемника-анализатора, фиксирующего амплитуду прошедшего сигнала.

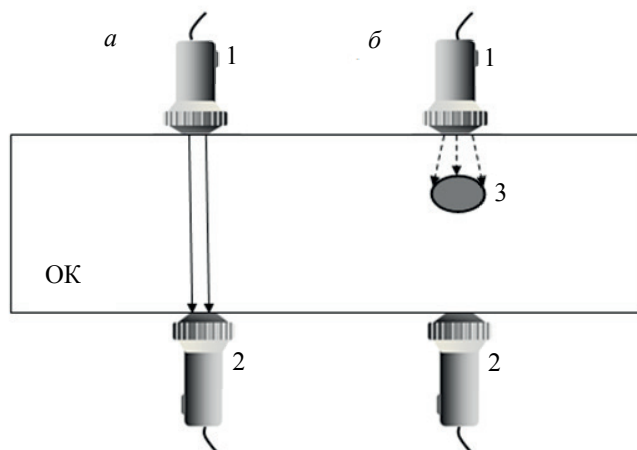


Рис. 1.3. Функциональная схема амплитудного теневого метода для изделия без дефекта (а) и с дефектом (б):

1 — электроакустический преобразователь; 2 — приемный преобразователь; 3 — дефект

- ◇ Информативный параметр метода — амплитуда прошедшего сигнала. Режим излучения непрерывный. Способ получения информации пьезоэлектрический.

Изображение на экране дефектоскопа показано на рис. 1.4 как при наличии дефекта, так и при его отсутствии.

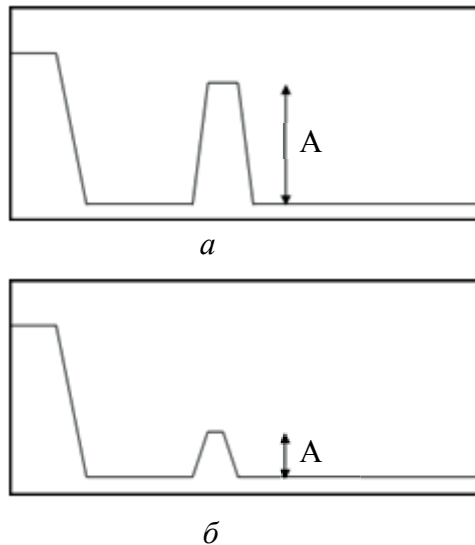


Рис. 1.4. Вид экрана дефектоскопа для изделия без дефекта (а) и с дефектом (б) при контроле амплитудным теньевым методом

При отсутствии нарушений сплошности материала приемный преобразователь регистрирует амплитуду прошедшего (донного) сигнала (рис. 1.4, а). Интенсивность прошедших волн меньше интенсивности волн, введенных в изделие, т. к. при распространении их в материале ОК наблюдаются потери энергии УЗК в результате затухания и геометрического расхождения пучка. При постоянной толщине изделия, заданной степени шероховатости и параллельности верхней и нижней поверхностей изделия амплитуда прошедшей волны во время контроля изменяется в небольших пределах. В дефектном изделии амплитуда прошедшего сигнала уменьшается (рис. 1.4, б), т. к. за дефектом образуется акустическая тень.

Теневым методом применяют в основном для контроля проката малой и средней толщины, некоторых резиновых изделий, для исследования упругих свойств стеклопластиков, бетона, графита и т. д. Теневым методом имеет высокую помехоустойчивость и слабую зависимость амплитуды сигнала от угла ориентации дефекта. Однако имеются се-

рьезные недостатки: необходимость двустороннего доступа и малая точность оценки координат дефекта.

1.2.2. Временной теневой метод

Временной теневой метод основан на измерении времени запаздывания t импульса прошедшей волны, вызванного огибанием дефекта. Функциональная схема метода приведена на рис. 1.5.

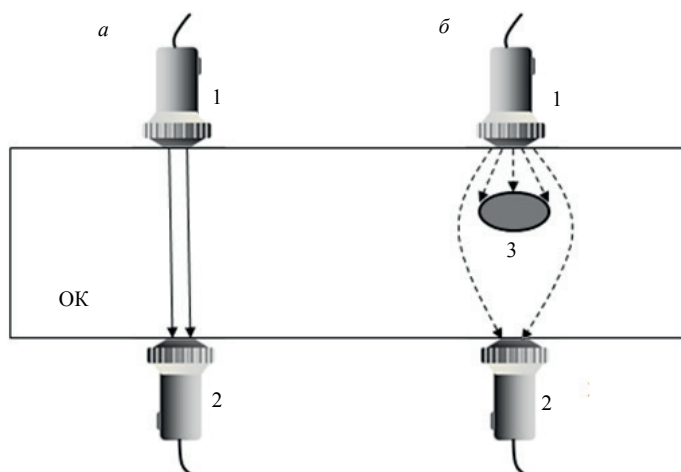


Рис. 1.5. Функциональная схема временного теневого метода для изделия без дефекта (а) и с дефектом (б):

1 — электроакустический преобразователь; 2 — приемный преобразователь; 3 — дефект

- ◇ Информативный параметр метода — время прохождения импульса. Режим излучения импульсный. Способ получения информации пьезоэлектрический.

В дефектном изделии время прохождения импульса увеличивается, т. к. волна огибает дефект. Изображение на экране дефектоскопа показано на рис. 1.6.

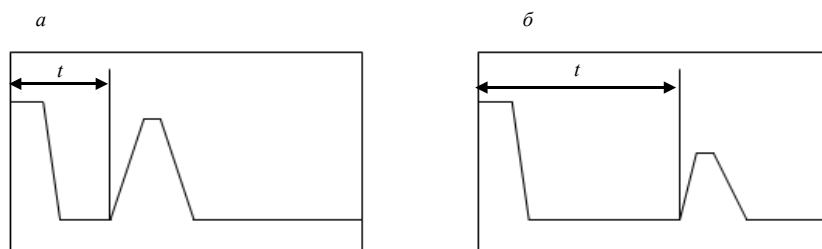


Рис. 1.6. Вид экрана дефектоскопа для изделия без дефекта (а) и с дефектом (б) при контроле временным теневым методом

Временной теневой метод особенно эффективен при контроле материалов с большим рассеянием УЗК, например, бетона, огнеупорного кирпича и т. п.

1.2.3. Велосиметрический метод

Велосиметрический метод основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Например, если в тонком изделии распространяется изгибная волна, то появление расслоения вызывает уменьшение ее скорости. Это явление фиксируют по сдвигу фазы прошедшей волны или запаздыванию прихода импульса. Функциональная схема метода приведена на рис. 1.7.

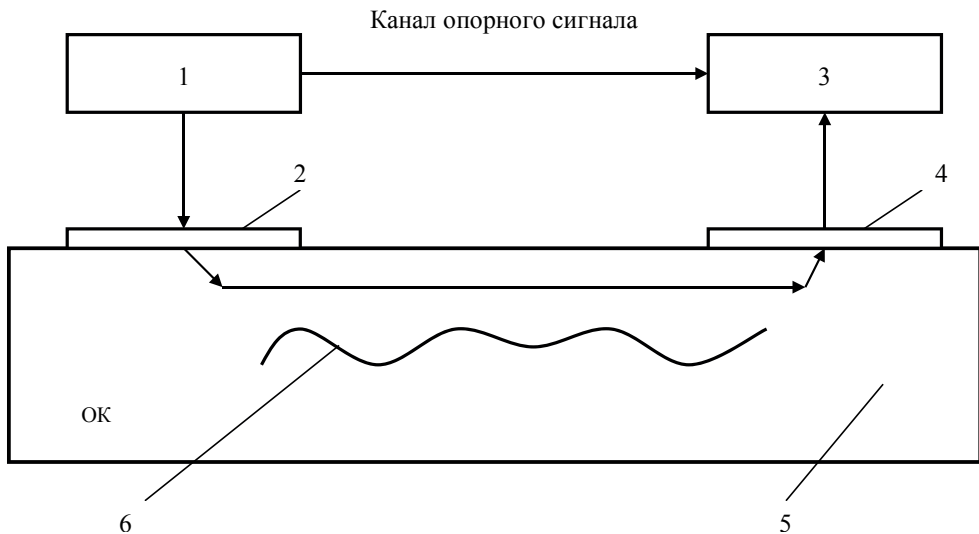


Рис. 1.7. Функциональная схема велосиметрического метода:

1 — генератор; 2 — излучающий преобразователь; 3 — измерительный блок;
4 — приемный преобразователь; 5 — изделие; 6 — дефект

Генератор 1 вырабатывает электрический сигнал, а излучающий преобразователь 2 возбуждает упругую волну в изделии. Приемный преобразователь 4 преобразует упругую волну в электрические колебания, которые после усиления поступают на измерительный блок 3. Скорость волны в изделии с дефектом уменьшается, что приводит к изменению фазы прошедшего сигнала по сравнению с опорным.

♦ Информативный параметр метода — изменение фазы прошедшего сигнала. Режим излучения непрерывный. Способ получения информации пьезоэлектрический.

Велосиметрический метод используется при контроле тонких объектов, например листов, а также многослойных изделий. Выявляются дефекты типа трещин и расслоений.

1.3. Методы отражения

Методы отражения используют сигналы, отраженные от дефектов. Информативными параметрами могут быть амплитуда волны (содержит информацию о размере дефекта), время прихода импульса (характеризует глубину залегания дефекта), фаза колебаний. Методы отражения включают эхометод, зеркальный эхометод, дельта-метод, реверберационный метод.

1.3.1. Эхометод

Эхометод — метод, основанный на регистрации эхосигналов от дефектов. Схема метода приведена на рис. 1.8.

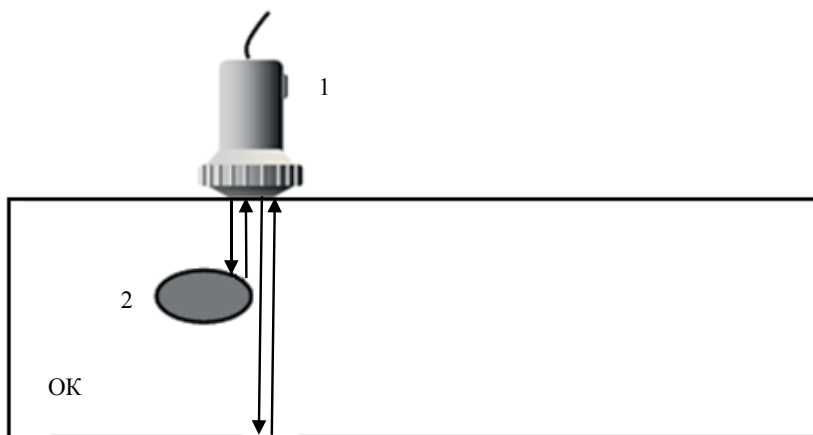


Рис. 1.8. Функциональная схема эхометода:

1 — пьезоэлектрический преобразователь; 2 — дефект

Прошедшие через изделия упругие волны отражаются от дефектов и противоположной поверхности (дна) ОК. Принятые сигналы после усиления и детектирования в приемно-усилительном блоке подаются на Y-отклоняющие пластины индикатора. Генератор развертки вырабатывает напряжение, зависящее от времени по линейному закону. Это напряжение поступает на X-отклоняющие пластины индикатора.

В результате экран УЗ дефектоскопа отображает информацию двух видов. Горизонтальная линия (линия развертки дефектоскопа) соответствует времени пробега импульса в ОК, вертикальная линия соответствует амплитуде эхосигналов. Такое изображение называют *разверткой типа А (А-разверткой, А-сканом)*.

- ◇ Информативные параметры метода — амплитуда эхосигнала (характеризует отражательную способность дефекта, пропорциональна его эквивалентной площади), время прихода эхосигнала (позволяет определить глубину залегания дефекта). Режим излучения импульсный. Способ получения информации пьезоэлектрический.

Изображение на экране дефектоскопа при контроле изделий эхо-методом показано на рис. 1.9.

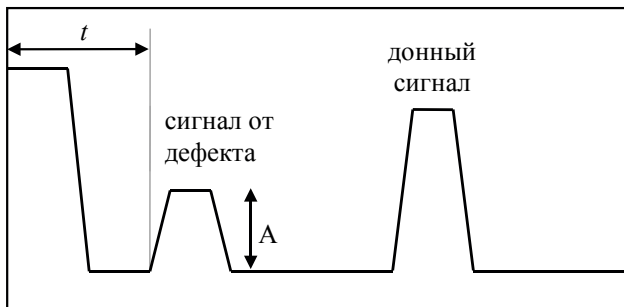


Рис. 1.9. Вид экрана дефектоскопа для изделия с дефектом при контроле эхометодом

Эхосигнал от дефекта приходит раньше донного сигнала, и амплитуда его обычно значительно меньше. Измеряя времена приходов сигнала по шкале на экране, можно определить расстояние до дефекта или дна изделия. Амплитуда эхосигнала характеризует отражательную способность дефекта и позволяет оценить его размер.

Благодаря универсальности, надежности, высокой чувствительности к выявлению дефектов, возможности применения к различным материалам, эхо-метод получил наибольшее распространение среди акустических методов контроля.

1.3.2. Эхозеркальный метод

В эхозеркальном методе анализируют сигналы, отраженные от дефекта и донной поверхности изделия. Существует несколько вариантов реализации данного метода. Вариант, называемый «тандем», предназначен для выявления вертикально ориентированных дефектов. В этом

случае используются два наклонных преобразователя, один из которых излучатель, а другой приемник. Преобразователи расположены по одну сторону от ОК (рис. 1.10).

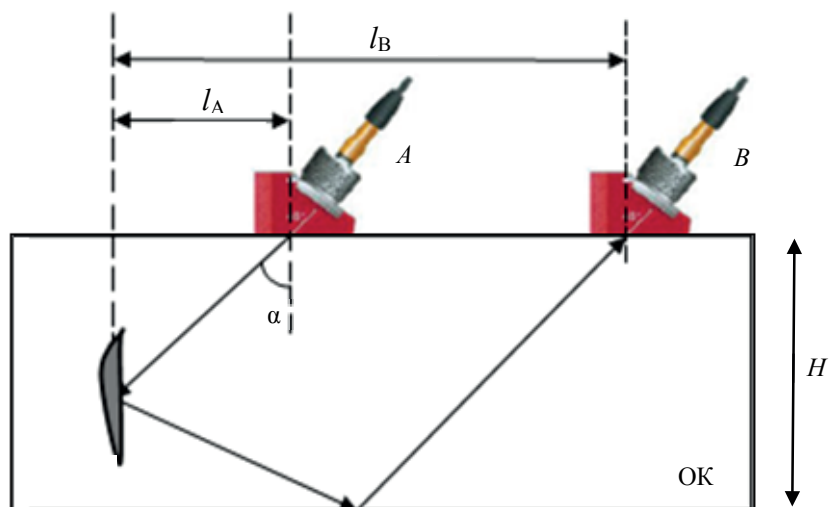


Рис. 1.10. Схема контроля по способу «тандем»:

A, B — наклонные преобразователи; α — угол ввода луча; H — толщина ОК

Для точного определения места расположения дефекта требуется выполнение условия

$$l_a + l_b = 2H \operatorname{tg} \alpha,$$

где l_a, l_b — расстояния от края дефекта до точек выхода луча преобразователей A и B соответственно;

H — толщина объекта контроля;

α — угол ввода луча.

Для получения максимального (зеркального) отражения от неперпендикулярных дефектов значение $l_a + l_b$ варьируют.

Другая разновидность эхозеркального метода — «К-метод», применяется, если возможен двусторонний доступ к ОК. В этом случае используются два наклонных преобразователя, расположенных по разные стороны от ОК (рис. 1.11).

Признаком наличия дефекта в эхозеркальном методе является появление импульса на заданном участке развертки экрана дефектоскопа.

♦ Информативный параметр метода — амплитуда эхосигнала. Способ получения информации пьезоэлектрический.

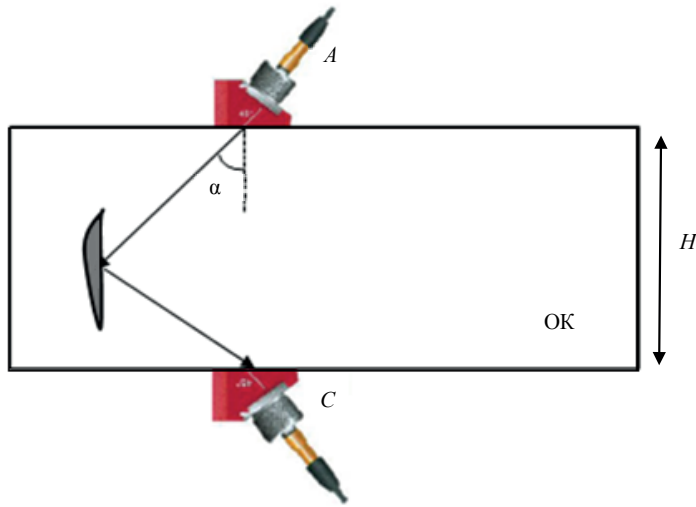


Рис. 1.11. Схема «К-метода»:

A, C — наклонные преобразователи; α — угол ввода луча; H — толщина ОК

1.3.3. Дельта-метод

Дельта-метод основан на явлении дифракции волн на дефекте. В качестве излучателя используется наклонный преобразователь 1 (рис. 1.12), возбуждающий поперечную волну. На краях дефекта происходит трансформация поперечной волны в продольную. В качестве приемника используется прямой преобразователь 2, воспринимающий два сигнала: один от верхнего края дефекта, а второй, пришедший позже, от нижнего края дефекта после отражения от донной поверхности ОК.

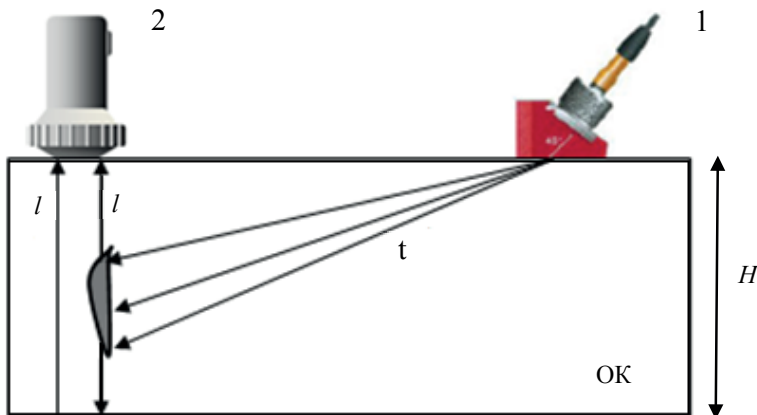


Рис. 1.12. Схема контроля дельта-методом:

1 — излучатель; 2 — приемник; t — поперечные волны; l — продольные волны

- ◇ Информативные параметры метода — амплитуда продольной волны (пропорциональна величине остроты краев трещины, а значит, степени ее опасности), запаздывание по времени импульса от нижнего края дефекта относительно импульса от верхнего края дефекта (характеризует протяженность трещины). Способ получения информации пьезоэлектрический. Режим излучения импульсный.

Дельта-метод применяется для выявления вертикально ориентированных плоскостных дефектов. Недостатком этого метода является сложная схема сканирования: сначала устанавливается излучатель и проводится сканирование приемником, затем излучатель перемещается в следующую позицию, и сканирование проводится вновь, и т. д.

1.3.4. Реверберационный метод

Реверберационный метод основан на анализе времени объемной реверберации — процесса постепенного затухания звука в некотором объеме. Метод применяется для контроля сложных паяных или клеёных изделий в целях обнаружения дефектов типа несплошностей. Схема метода приведена на рис. 1.13. Преобразователь включен по совмещенной схеме и является излучателем и приемником одновременно. Перемещая преобразователь вдоль поверхности ОК, измеряют время затухания импульсов t_r — время объемной реверберации. При наличии дефекта время затухания импульсов увеличивается (рис. 1.14).

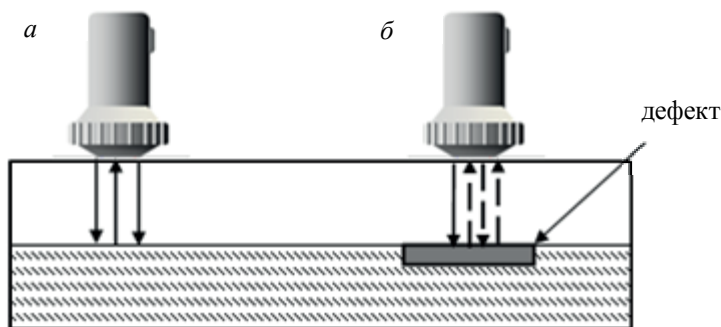


Рис. 1.13. Схема контроля реверберационным методом: для изделия (а), без дефекта и с дефектом (б)

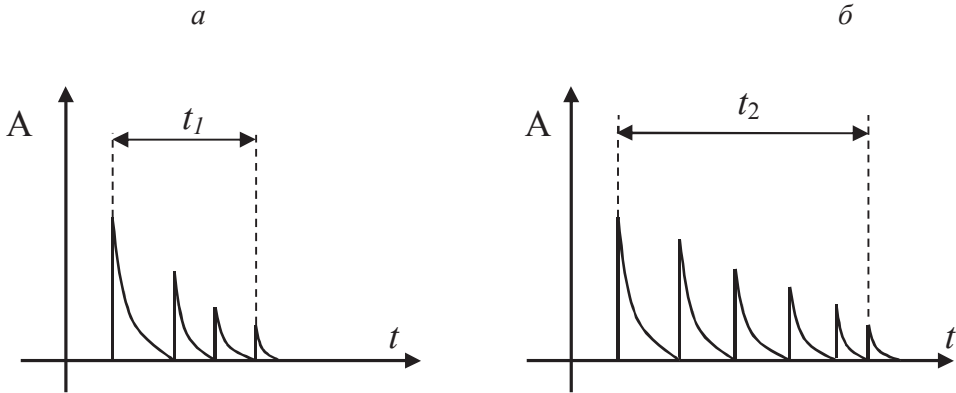


Рис. 1.14. Вид экрана дефектоскопа при контроле реверберационным методом:

a — при отсутствии дефекта; *б* — при наличии дефекта: t_1 , t_2 — время реверберации при отсутствии дефекта и при наличии дефекта соответственно

В процессе контроля многослойной конструкции при доброкачественном соединении слоев время реверберации будет меньше (рис. 1.14, *a*), т. к. энергия УЗ колебаний переходит от слоя к слою. При наличии дефекта, препятствующего передаче энергии УЗ колебаний между слоями, время реверберации увеличивается (рис. 1.14, *б*).

1.4. Импедансный метод

Импедансный метод основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка поверхности контролируемого объекта, с которым взаимодействует преобразователь.

Величина акустического импеданса Z определяется в соответствии с соотношением (1.1)

$$Z = \frac{|p|}{|v|} = \rho c, \quad (1.1)$$

где p — акустическое давление;

v — колебательная скорость (скорость, с которой колеблются частицы вещества в поверхностном слое ОК);

ρ — плотность среды;

c — скорость звука.

Механический импеданс Z_M

$$Z_M = \frac{|F|}{|v|},$$

где F — приложенная сила.

На рис. 1.15 показана принципиальная схема контроля импедансным методом.

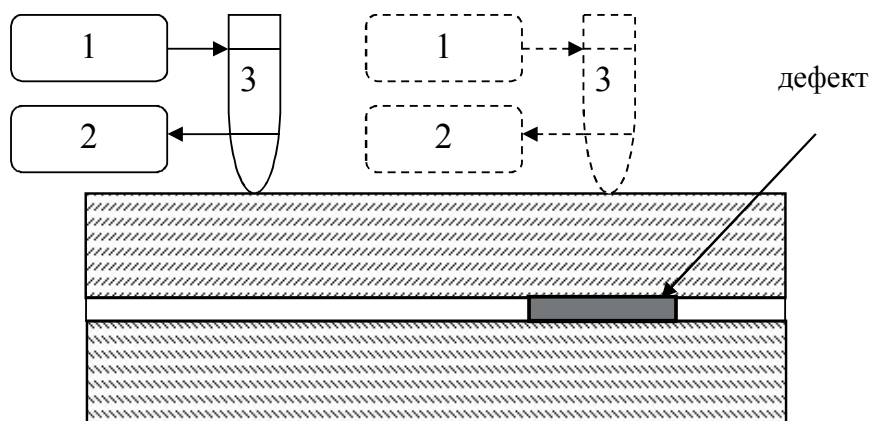


Рис. 1.15. Схема контроля импедансным методом:

1 — генератор; 2 — анализатор; 3 — колеблющийся стержень

В качестве преобразователя используется колеблющийся стержень, прижатый к ОК. Наличие подповерхностного дефекта (непроклея, непропая, расслоения) приводит к изменению площади соприкосновения стержня с поверхностью ОК, за счет чего меняется модуль входного механического импеданса ОК.

♦ Информативные параметры метода — амплитуда, фаза, частота колебаний стержня.

Импедансный метод позволяет обнаруживать зоны нарушения жесткой связи между элементами слоистых конструкций: непрочные, непропаи, расслоения, слабую адгезию и т. д.

1.5. Метод свободных колебаний

Метод свободных колебаний основан на анализе частотного спектра свободных колебаний, возбуждаемых в контролируемом изделии (рис. 1.16). Блоки 1–3 предназначены для генерации, излучения и приема УЗК, блоки 4 и 5 относятся к регистрирующей части дефектоскопа.

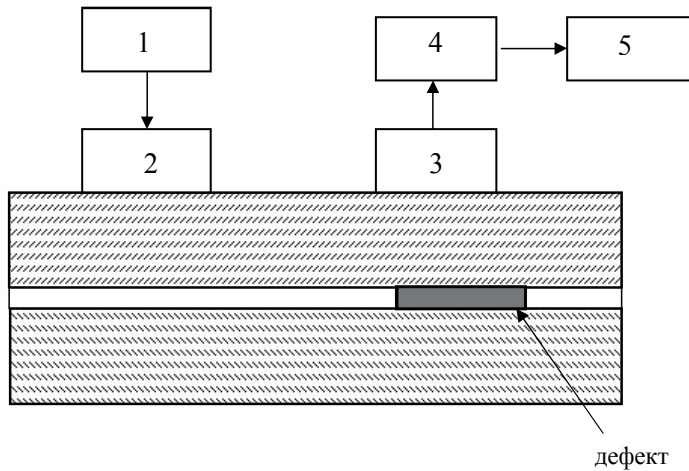


Рис. 1.16. Схема контроля методом собственных колебаний:

1 — генератор; 2 — вибратор; 3 — приемник; 4 — анализатор спектра; 5 — индикатор

Путем кратковременного внешнего воздействия на ОК, например ударом, возбуждают свободные колебания, в результате чего в ОК возникнут свободные (собственные) затухающие колебания.

♦ Информативный параметр метода — частотный спектр. Способ получения информации микрофонный.

При заданных размерах и форме изделия, однородности материала, из которого оно изготовлено, частота собственных колебаний является величиной определенной. При наличии дефекта параметры колебательной системы меняются, что ведет к изменению частотного спектра колебаний. В дефектных изделиях спектр смещен в сторону низких частот (рис. 1.17).

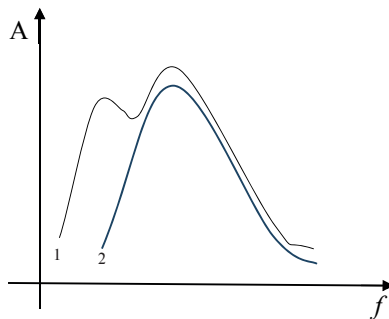


Рис. 1.17. Спектральный состав акустического сигнала при контроле методом свободных колебаний:

1 — изделие с дефектом, 2 — бнз дефекта

Этот метод позволяет выявить нарушения жесткой связи между слоями в многослойных конструкциях, а также внутренние дефекты в массивных изделиях.

1.6. Резонансный метод

Резонансный метод основан на возбуждении стоячих волн в изделии. Схема метода показана на рис. 1.18.

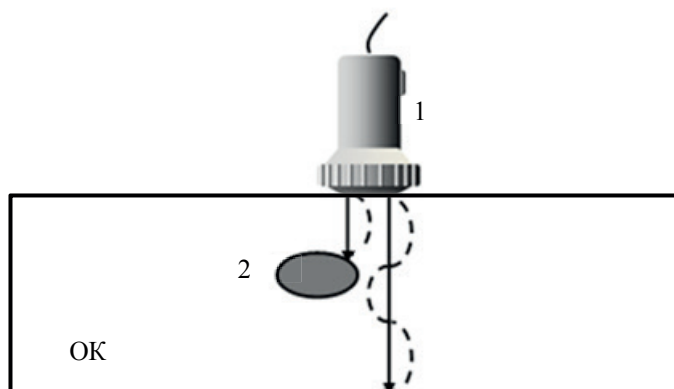


Рис. 1.18. Схема контроля резонансным методом:
1 — преобразователь, 2 — дефект

Для возбуждения и приема УЗ колебаний используют совмещенный преобразователь. При совпадении частот возбуждения с собственными частотами ОК в системе возникает резонанс.

Частота, при которой возникают стоячие волны, зависит от толщины ОК и скорости распространения в материале изделия акустических волн.

Условие резонанса для объекта толщиной h

$$h = n\lambda / 2 ,$$

где n — целое число.

С помощью резонансного метода решают все три задачи неразрушающего контроля:

- выявления дефектов;
- измерения толщины;
- определения физических свойств.

Частоту колебаний модулируют (изменяют во времени) и фиксируют частоты, на которых возбуждаются резонансные колебания. Резонансные частоты определяются по толщине изделия, наличию и месторасположению дефектов. Дефекты приводят к исчезновению резонансов. Возможно также определение скорости звука в материале изделия по известному значению резонансной частоты.

♦ Информативный параметр метода — резонансная частота. Способ получения информации пьезоэлектрический.

Ультразвуковой резонансный метод используют для обнаружения дефектов в виде коррозии или несплошностей материала, а также для измерения толщины листов, стенок труб, резервуаров и т. д.

Методы собственных частот и резонансные методы подразделяются на интегральные и локальные. В интегральных методах колеблется все изделие целиком и выявляются дефекты, расположенные в любой его части. Интегральный метод позволяет оценить качество всего изделия, но, как правило, не дает возможности определить месторасположение дефекта. В локальных методах колебания возбуждаются лишь в части изделия, что позволяет локализовать местонахождение дефекта.

1.7. Комбинированные методы

В комбинированных методах используются принципы как прохождения, так и отражения акустических волн. К числу комбинированных методов относятся: зеркально-теневой, эхотеневой и эхосквозной методы. Благодаря совместному применению методов отражения и прохождения достигается повышение надежности контроля.

1.7.1. Зеркально-теневой метод

Зеркально-теневой метод основан на измерении амплитуды донного сигнала. Схема метода показана на рис. 1.19. По технике выполнения это метод отражения (фиксируется эхосигнал), а по физической сущности (измеряют ослабление дефектом сигнала, дважды прошедшего ОК) он близок к теневому методу, поэтому его относят к комбинированным методам.

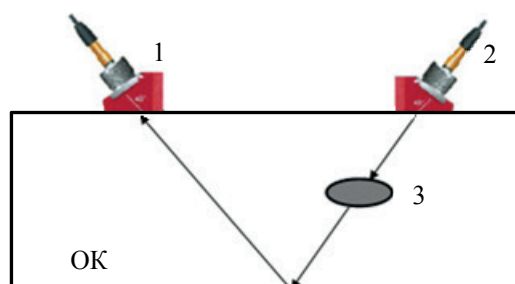


Рис. 1.19. Схема контроля зеркально-теньевым методом:

1 — приемник; 2 — излучатель; 3 — дефект

◇ Информативный параметр метода — амплитуда донного сигнала.

Критерием наличия дефекта при контроле зеркально-теньевым методом является уменьшение амплитуды донного сигнала.

Коэффициент выявляемости дефекта K_d

$$K_d = A_{\min} / A_0,$$

где A_{\min} — минимальная амплитуда донного сигнала при наличии дефекта на пути УЗК;

A_0 — амплитуда донного сигнала при отсутствии дефекта.

Чем больше размер дефекта, тем меньше коэффициент выявляемости. К недостаткам зеркально-теневого метода относятся:

- невысокая чувствительность к отдельным мелким дефектам;
- требование повышенной стабильности акустического контакта;
- снижение достоверности результатов, обусловленное шероховатостью поверхности ОК.

Зеркально-теньевой метод часто применяется совместно с эхометодом. Наблюдают одновременно за появлением эхосигналов и возможным ослаблением донного сигнала дефектами, которые не дают четких эхосигналов и плохо выявляются эхометодом. Это может быть скопление очень мелких дефектов, а также дефект, расположенный так, что отраженный от него сигнал уходит в сторону и не попадает на приемный преобразователь.

1.7.2. Эхотеневой метод

Эхотеневой метод основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рис. 1.20). Один ПЭП включен по совмещенной схеме,

как в эхометод, и регистрирует отраженные от дефекта сигналы. Второй ПЭП расположен по другую сторону изделия и принимает прошедшие сигналы.

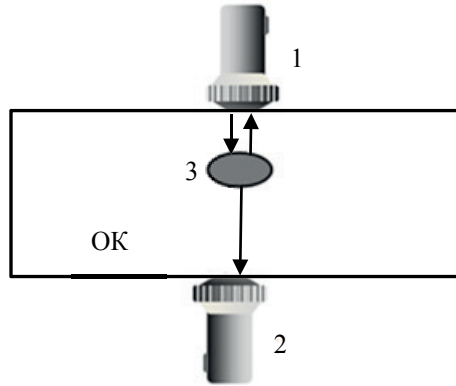


Рис. 1.20. Схема контроля эхотеневым методом:

1 — преобразователь (излучатель и приемник); 2 — преобразователь (приемник);
3 — дефект

◇ Информативные параметры метода — амплитуды отраженной и прошедшей волны, время прихода отраженных импульсов.

К достоинствам эхотеневого метода относится большая вероятность обнаружения дефектов и возможность оценки характера дефектов. Эхотеневый метод применяется при механизированном контроле сварных стыков труб. Для реализации данного метода необходима аппаратура с двумя приемными каналами.

1.7.3. Эхосквозной метод

Эхосквозной метод использует несколько сигналов, прошедших через изделие, в том числе отраженные от дефекта. Преобразователи, один излучающий, другой приемный, расположены по разные стороны от изделия соосно друг другу. Схема метода показана на рис. 1.21.

В эхосквозном методе фиксируют сквозной сигнал I, однократно прошедший через ОК, сигнал II, двукратно испытавший отражение в ОК. При наличии большого непрозрачного или полупрозрачного дефекта эти сигналы уменьшаются как в теновом, так и в зеркально-теновом методе. При появлении полупрозрачного или небольшого по размерам дефекта появляются эхосигналы III и IV, соответствующие отражениям от дефекта верхней и нижней поверхностей ОК.

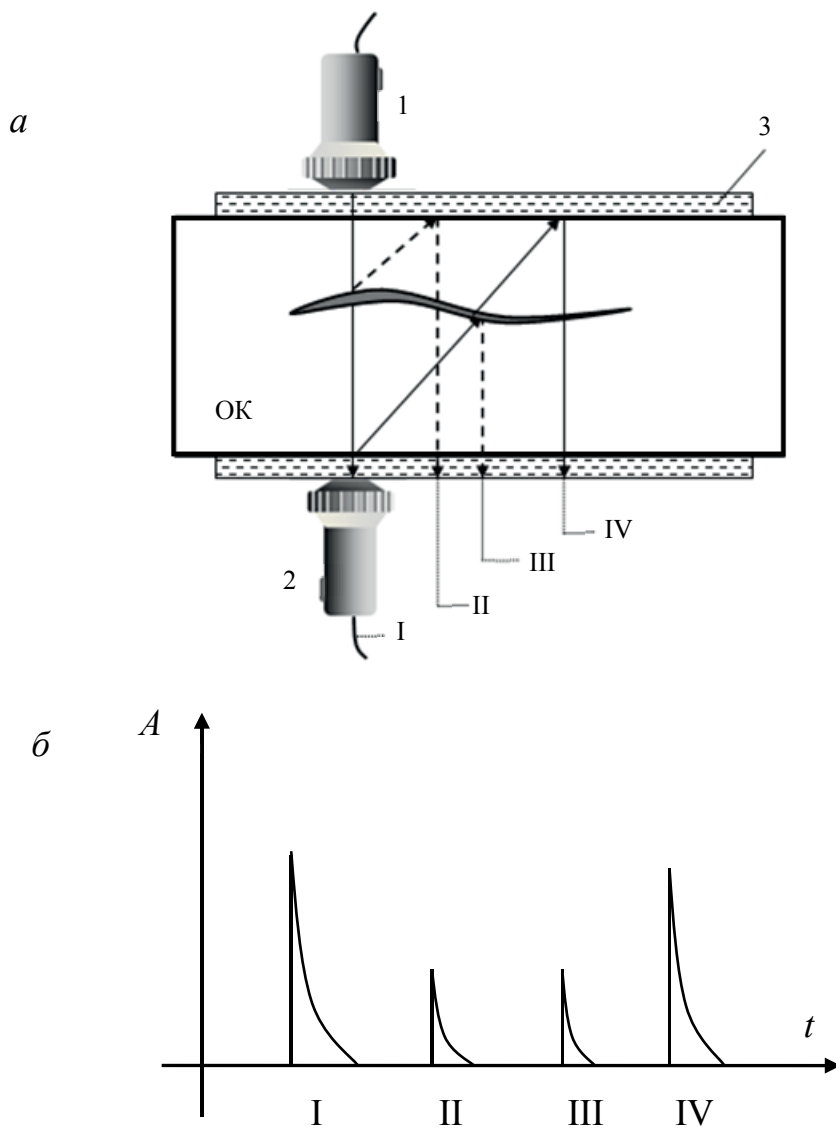


Рис. 1.21. Схема контроля эхосквозным методом (а) (1 — преобразователь (излучатель); 2 — преобразователь (приемник); 3 — слой контактной жидкости) и изображение на экране дефектоскопа (б) (I — прошедший сигнал; II — двукратно отраженный сигнал; III — сигнал, отраженный от дефекта; IV — сигнал, отраженный от дефекта и одной из границ контролируемого изделия)

◇ Информативные параметры метода — амплитуды сигналов.

Преимущества метода:

- повышенная чувствительность по сравнению с теневыми методами;
- время прихода сигналов не зависит от взаимных перемещений изделия по отношению к преобразователям;
- шероховатость поверхности не сказывается на результатах контроля;
- практически полное отсутствие «мертвой зоны».

1.8. Пассивные методы АК

1.8.1. Акустико-эмиссионный метод

Акустическая эмиссия (АЭ) — это генерация упругих волн в результате внутренней динамической локальной перестройки структуры материала.

Источники акустической эмиссии:

- возникновение и развитие микротрещины;
- процессы пластической деформации (стадии предразрушения);
- процессы коррозии;
- процессы фазовых превращений (плавление, кристаллизация, полиморфные и мартенситные превращения и др.);
- фрикционные явления (трение);
- процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков.

Схема метода приведена на рис. 1.22.

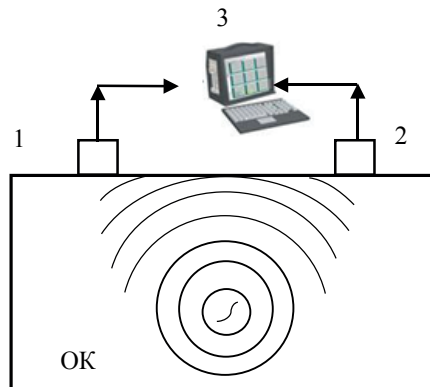


Рис. 1.22. Схема метода акустической эмиссии:

1, 2 — излучатели; 3 — приемник

Поскольку источником акустико-эмиссионной энергии служит поле упругих напряжений в материале, акустико-эмиссионный контроль проводится путем нагружения контролируемого объекта. Это может быть проверочный контроль перед запуском объекта, периодический контроль в процессе эксплуатации или мониторинг.

♦ Информативные параметры акустической эмиссии (АЭ):

- суммарный счет N — число зарегистрированных импульсов АЭ, превышающих установленный порог за все время наблюдения;
- число импульсов за время наблюдения N_{Σ} ;
- активность — количество импульсов за некоторый интервал времени наблюдения dN_{Σ}/dt ;
- скорость счета dN/dt — число импульсов, превышающих установленный порог в единицу времени;
- спектр частот;
- амплитуда сигнала A ;
- суммарная интенсивность $I = \sum_{i=1}^N I_i$.

Приборы для контроля методом АЭ часто делают многоканальными. Обработка сигналов от нескольких преобразователей позволяет определить месторасположение дефекта. Пример схемы, использующей явление АЭ для выявления развивающихся дефектов типа трещин в сосуде, приведен на рис. 1.23.

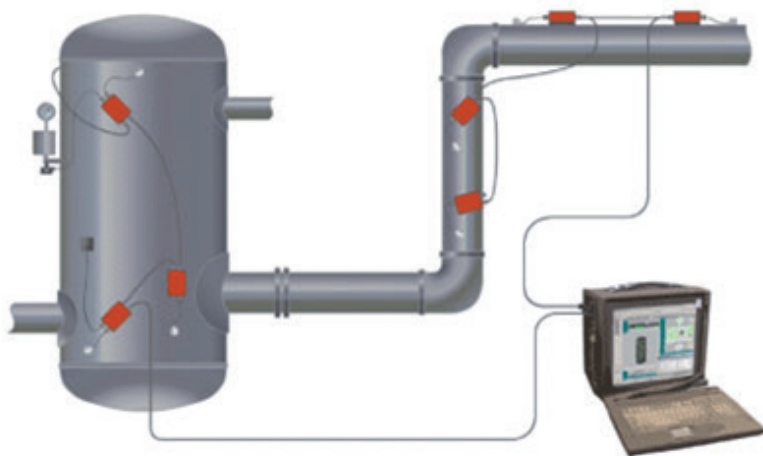


Рис. 1.23. Акустико-эмиссионная система для контроля сосудов и трубопроводов

По разнице времени прихода сигнала от датчиков определяют месторасположение дефекта. Метод АЭ является дистанционным, т. е. не требует сканирования поверхности ОК для поиска локальных дефектов. Необходимо лишь правильное размещение датчиков на поверхности объекта для осуществления локализации источников АЭ. Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, предоставляют большие преимущества по сравнению с другими методами НК. Недостатком метода АЭ является повышенная чувствительность к помехам и шумам.

1.8.2. Вибро- и шумодиагностика

Вибродиагностический метод анализирует параметры вибрации какой-либо отдельной детали или узла, например подшипника, ротора, с помощью приемников контактного типа. Спектр периодических вибраций представляет собой систему линий.

Шумодиагностический метод изучает спектр шумов работающего механизма с помощью микрофонных приемников. Спектр шумов имеет непрерывную составляющую.

В состав аппаратуры вибро- и шумодиагностики входят широкополосные приемники, например, микрофоны, усилители и анализаторы спектра. Основной задачей методов диагностики является не только обнаружение неисправностей детали или узла, но и определение ресурса механизма в целом.

1.9. Способы осуществления акустического контакта

Акустический контакт — способ передачи акустического сигнала из объекта контроля в преобразователь и наоборот. Акустические волны сильно отражаются от тонких воздушных зазоров. Поэтому для передачи волн от преобразователя к объекту такие промежутки часто заполняются жидкостью.

Бесконтактный способ. Акустические колебания в ОК возбуждаются через слой воздуха либо создаются в ОК с помощью действия электромагнитных, оптических, тепловых и других явлений. Данный метод контакта имеет пониженную чувствительность контроля, но его применение оправдано в следующих случаях:

- объект контроля имеет грубую поверхность;
- высокие скорости контроля;

- контроль ведется при высоких температурах;
- поверхность контролируемого объекта загрязнена.

Щелевой (менисковый) способ. Иммерсионная жидкость удерживается в зазоре между преобразователем и поверхностью объекта контроля силами поверхностного натяжения (рис. 1.24). В щелевом способе длина волны соизмерима с толщиной иммерсионного слоя $h \approx \lambda$.

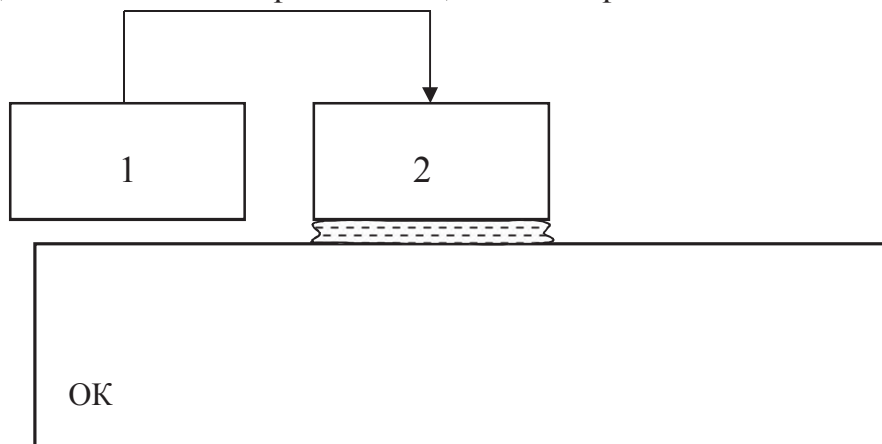


Рис. 1.24. Щелевой акустический контакт

Контактный метод. Для обеспечения акустического контакта преобразователь должен быть плотно прижат к поверхности объекта контроля, смазанного жидкостью (например, трансформаторным маслом) для сглаживания шероховатости. Толщина слоя контактной жидкости существенно меньше длины волны УЗК: $h \gg \lambda$.

Иммерсионный метод. Объект контроля погружается в иммерсионную жидкость целиком. Также возможно применение локальной жидкостной ванны для части ОК. В этом случае толщина слоя жидкости — расстояние между преобразователем и поверхностью объекта контроля — существенно больше длины волны: $h \ll \lambda$. Иммерсионный способ используется в тех методах контроля, для которых особенно важна стабильность акустического контакта (таких как амплитудный, теневой, эхосквозной методы).

Контактные среды должны соответствовать следующим требованиям:

- иметь малое поглощение энергии акустических колебаний;
- обеспечивать хорошую смачиваемость;
- быть экологически безвредными;

- не должны вызывать коррозию изделия;
- свойства контактной среды должны сохраняться во всем рабочем интервале температур;
- контактная среда не должна быть дорогостоящей, что особенно важно для иммерсионного способа контакта.

1.10. Преимущества и недостатки АК

Основные преимущества АК:

- возможность контроля изделий из самых различных металлических и неметаллических материалов независимо от их электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости;
- возможность выявления как поверхностных, так и внутренних дефектов;
- безопасность для исполнителей и окружающих;
- сравнительно небольшие затраты на контроль;
- мобильность и адаптивность;
- относительная легкость автоматизации.

Основные недостатки акустических методов НК:

- трудность или невозможность контроля изделий из неоднородных крупнозернистых материалов (нетермообработанных литых металлов, например, аустенитных сталей, некоторых типов чугунов);
- требование ровной, гладкой поверхности изделия;
- трудность контроля изделий малых размеров или сложной формы.

Из рассмотренных методов АК наибольшее практическое применение находит эхометод. Около 90 % объектов, контролируемых акустическими методами, проверяют эхометодом. С его помощью решают задачи дефектоскопии литья, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхометод используют также для измерения геометрических параметров ОК и оценки физико-механических свойств материалов.

Другие методы АК применяют для решения задач контроля, в котором использование эхометода невозможно, либо в качестве дополнительных к эхометоду для более полного обнаружения и исследования дефектов. В табл. 1.1 приведена краткая сравнительная характеристика методов АК.

Таблица 1.1

Краткая сравнительная характеристика методов АК

Метод	Преимущества метода	Особенность применения
Эхометод	Односторонний доступ к изделию	Контроль литья, сварных соединений, неметаллических материалов, определение геометрических размеров и физико-механических свойств
Зеркально-теневой	Выявление слабо отражающих дефектов перпендикулярно поверхности контроля	Контроль литья, металла
Эхозеркальный	Выявление более мелких дефектов, чем зеркально-теневым методом	Контроль литья, металла
Дельта-метод	Получение дополнительной информации о дефектах сварных соединений, определение геометрии дефекта	Контроль сварных соединений
Эхотеневой	Обнаружение слабо отражающих дефектов	Автоматизированный контроль сварных соединений
Теневой, эхосквозной	Возможность контроля изделий с большим уровнем реверберационных помех	Автоматизированный контроль сварных соединений, тонких металлических изделий простой формы (листовой прокат), контроль физико-механических свойств неметаллических материалов

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируют методы неразрушающего контроля?
2. Поясните различие между активными и пассивными методами АК.
3. Дайте определение информативных параметров метода АК. Приведите примеры.
4. Назовите преимущества и недостатки дельта-метода. Для каких целей он используется?
5. Что такое акустический импеданс? В каких единицах он измеряется?
6. В чем сущность резонансного метода АК?
7. Перечислите источники акустической эмиссии.
8. Что такое акустический контакт? Какие способы осуществления акустического контакта вы знаете?

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

2.1. Колебания и волны

Колебания — процессы, при которых состояние системы воспроизводится через определенные промежутки времени. Колебания бывают различной физической природы: механические, электромагнитные, световые, акустические.

Акустические колебания — механические колебания частиц упругой среды.

Упругость — свойство точек среды возвращаться к первоначальному состоянию после прекращения воздействия силы. Твердые тела обладают двумя видами упругости: упругостью объема (растяжение-сжатие) и упругостью формы (сдвиговая деформация).

Жидкости и газы обладают только упругостью объема.

Колебания можно разделить на две большие группы: свободные и вынужденные.

Свободные колебания совершает система, выведенная из положения равновесия и предоставленная самой себе. В реальных условиях за счет трения, диссипативных процессов и прочего свободные колебания являются затухающими, амплитуда колебаний уменьшается по экспоненциальному закону.

Вынужденные колебания совершаются под действием периодической силы, выводящей систему из положения равновесия. Если собственные частоты колебательной системы совпадают с частотой вынуждающих воздействий, то система входит в резонанс.

Колебания, возникнув в какой-либо точке, распространяются в среде. Волна — распространение колебаний в среде. Акустическая волна — распространение механического возмущения.

По времени протекания процесса, колебания и волны подразделяются на непрерывные и импульсные. Непрерывные колебания — колебания, продолжающиеся в течение времени, много большего, чем период. Периодом называют время одного полного колебания. Частота — величина, обратная периоду, — характеризует число циклов колебаний в единицу времени

$$f = 1/T.$$

В практике АК чаще всего используют волновые процессы, ограниченные во времени и пространстве. Вместо монохроматических колебаний применяют импульсы. Импульс (от лат. *impulsus* — удар, толчок) — ограниченный во времени колебательный процесс. Импульсные колебания подразделяются на видеоимпульсы и радиоимпульсы. Периодическая последовательность видеоимпульсов показана на рис. 2.1. Видеоимпульсы характеризуются амплитудой A , периодом повторения T_n и длительностью τ . Длительность импульса измеряется на уровне половины амплитуды, или по уровню 6 дБ от максимума, если по оси ординат отложена величина, измеренная в децибелах. Длительность фронта τ_f и длительность среза $\tau_{ср}$ измеряются по уровням 0,1 A и 0,9 A на переднем и заднем фронтах импульса. Величина, обратная периоду повторения, называется частотой повторения, или частотой следования импульсов,

$$F = 1/T_n.$$

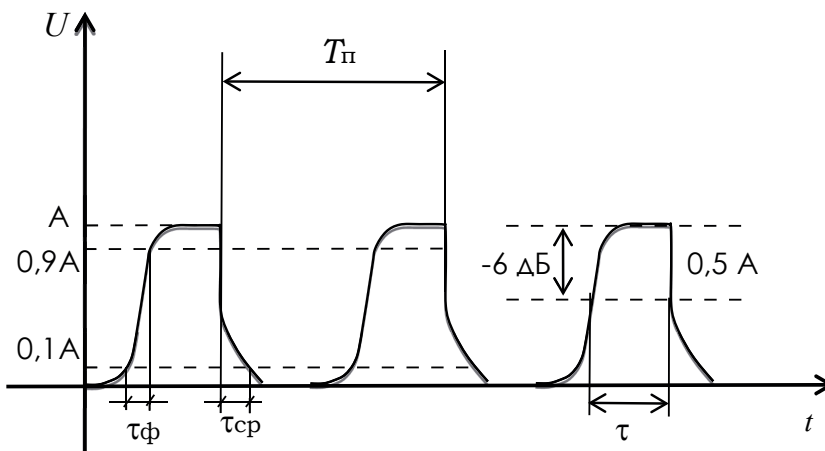


Рис. 2.1. Последовательность видеоимпульсов

Периодическая последовательность радиоимпульсов показана на рис. 2.2. Частоту высокочастотного заполнения называют несущей частотой радиоимпульса f_0 . Остальные параметры радиоимпульсов такие же, как параметры видеоимпульсов: амплитуда A , период повторения $T_{\text{п}}$, длительность импульса τ , длительность фронта $\tau_{\text{ф}}$ и среза $\tau_{\text{ср}}$, частота следования F . Эти параметры радиоимпульсов измеряют по огибающей.

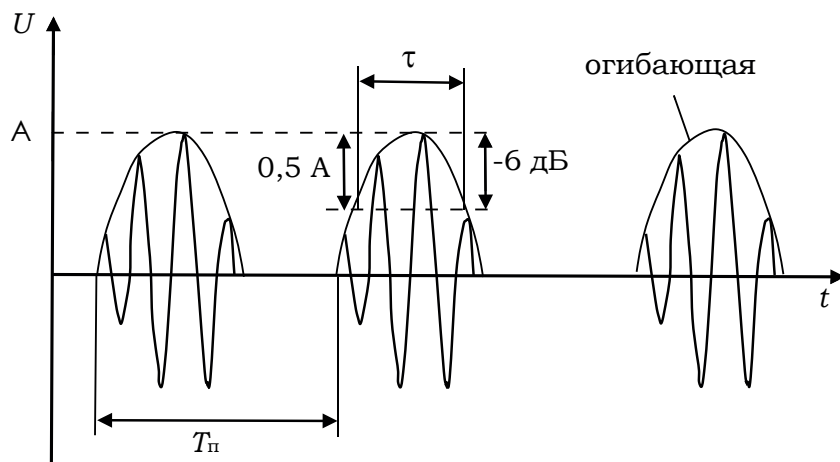


Рис. 2.2. Последовательность радиоимпульсов

Любой импульс можно представить как сумму (интеграл) гармонических колебаний разной частоты, имеющих разные амплитуды и начальные фазы, (анализ Фурье). На рис. 2.3 показано разложение прямоугольного импульса на гармонические составляющие.



Рис. 2.3. Разложение прямоугольного импульса на гармонические составляющие

Спектр импульса зависит от формы и длительности импульса. Чем короче импульс, тем в его спектре больше разных частот (спектр шире)

за счет увеличения амплитуд высокочастотных составляющих (по сравнению с основной частотой). Под шириной спектра обычно понимают ограниченный диапазон частот, внутри которого распределена большая часть энергии сигнала. На рис. 2.4 показана зависимость амплитудно-частотного спектра видеоимпульса от его длительности и периода.

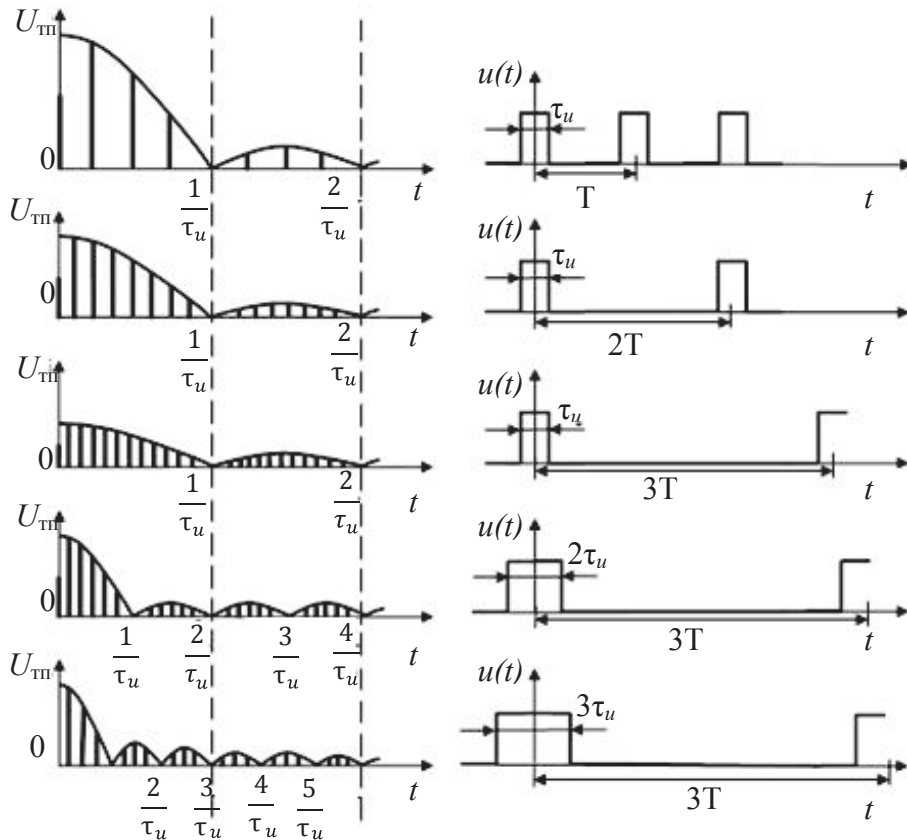


Рис. 2.4. Амплитудно-частотные спектры видеоимпульсов различной длительности и периода

С уменьшением частоты следования импульса при его постоянной длительности происходит «сгущение» спектра: расстояние между спектральными линиями уменьшается. Ширина спектра при этом не меняется, а основная часть энергии распределяется на большем числе гармоник. С увеличением длительности импульса при его постоянной частоте следования ширина спектра уменьшается, основная часть энергии рас-

пределяется на меньшем числе гармоник и сосредотачивается в области все более низких частот. Таким образом, чем меньше длительности импульсов и больше их скважность, тем шире и гуще их спектр, и наоборот.

Одним из наиболее простых и часто встречающихся в природе и технике видов колебательного движения являются гармонические колебания. Гармонические колебания — колебания, совершающиеся по закону синуса или косинуса. Общий вид гармонического колебания (рис. 2.5) выражается формулой

$$u = u_0 \sin(\omega t - \varphi_0),$$

где u_0 — амплитуда колебания;

ω — циклическая частота;

φ_0 — начальная фаза колебания.

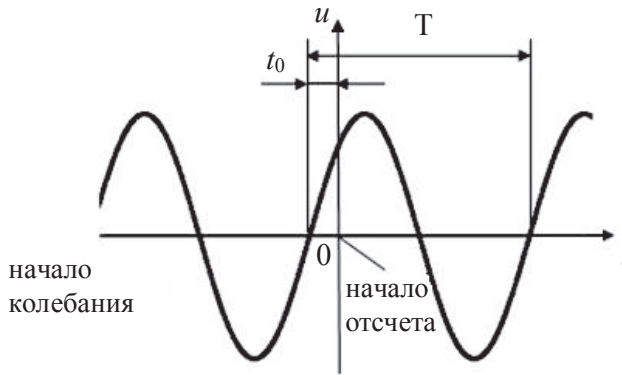


Рис. 2.5. Гармоническое колебание

Начальная фаза — доля периода, прошедшая с начала колебания до начала отсчета,

$$\varphi_0 = \frac{t_0}{T} \cdot 360^\circ.$$

Гармонические колебания, распространяясь в среде, создают гармоническую упругую волну. Упругие смещения гармонической волны описываются уравнением

$$u = u_0 \sin(\omega t - kr - \varphi_0),$$

где ω — циклическая частота;

k — волновое число;

r — расстояние, пройденное волной.

Волновое число определяется длиной волны

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Колебания от точки к точке среды передаются с определенной скоростью — скоростью распространения звука c . Расстояние между двумя точками среды, которые колеблются в одной фазе, называют длиной волны λ

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}.$$

Фаза φ показывает изменение упругих смещений и в пространстве, и во времени

$$\varphi = \omega t - kx - \varphi_0.$$

Для удобства математических операций упругие смещения гармонической волны представляют в комплексной форме

$$u = u_0 e^{i(kx - \omega t)}.$$

2.2. Волновой фронт. Плоские, сферические и цилиндрические волны

Волновая поверхность — геометрическое место точек, колеблющихся синфазно. Волновой фронт — волновая поверхность, разделяющая еще не возмущенный и возмущенный участки упругой среды (рис. 2.6).

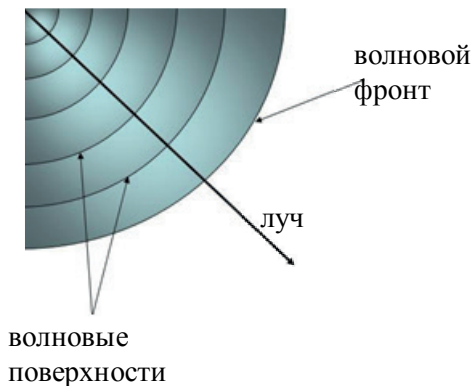


Рис. 2.6. Волновые поверхности и волновой фронт

В зависимости от формы источника звуковых колебаний различают акустические волны с различной формой волнового фронта: плоские, сферические и цилиндрические (рис. 2.7).

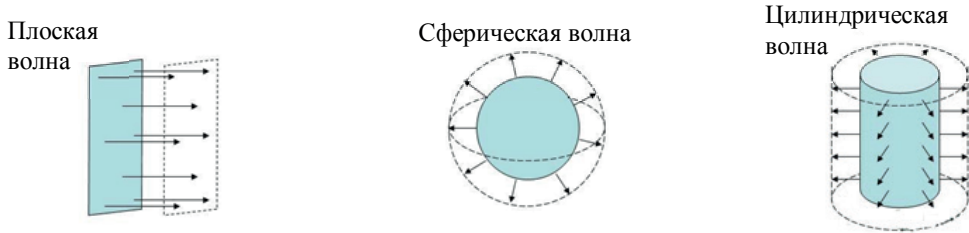


Рис. 2.7. Акустические волны с различной формой волнового фронта

Для плоских волн волновой фронт имеет вид плоскости. Источником таких волн являются плоскопараллельные пластины, испытывающие периодические деформации растяжения-сжатия по толщине. Для плоской волны расхождение лучей отсутствует, и ее ослабление обусловлено только затуханием в среде. Уравнение плоской волны

$$u(t, r) = u_0 \sin(\omega t - kr).$$

Волновые поверхности сферических волн имеют вид концентрических сфер. Источником сферических волн является точечный объект или сфера малого диаметра. Поскольку расхождение лучей осуществляется в двух плоскостях, ослабление амплитуды с увеличением расстояния r для такой волны будет максимальным. Уравнение сферической волны

$$u(t, r) = \frac{u_0}{r} \sin(\omega t - kr).$$

Цилиндрические волны имеют цилиндрический волновой фронт. Их источником является колеблющийся протяженный цилиндр малого диаметра. Волна с цилиндрическим фронтом распространяется в одной плоскости, вследствие чего ее амплитуда медленнее, чем у сферической волны, ослабевает с увеличением расстояния. Уравнение цилиндрической волны

$$u(t, r) = \frac{u_0}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr).$$

Различия между рассмотренными типами волн не сводятся только к геометрическому различию в форме волнового фронта, но имеют и ряд других особенностей. Если пренебречь затуханием, то амплитуда плоской волны не меняется при ее распространении, в то время как амплитуда сферической волны уменьшается с увеличением расстояния r от источника как r^{-1} , а цилиндрической — как $r^{-1/2}$.

Одной из характеристик акустических волн является *интенсивность* I — плотность потока энергии, переносимой волной через единицу площади по нормали к направлению распространения волны за единицу времени. Интенсивность прямо пропорциональна квадрату амплитуды и обратно пропорциональна величине акустического импеданса

$$I = \frac{u_0^2}{2Z},$$

где u_0 — амплитуда колебаний;

Z — акустический импеданс.

Для плоских волн интенсивность — величина постоянная, для сферических волн интенсивность обратно пропорциональна квадрату расстояния, а для цилиндрических волн интенсивность обратно пропорциональна расстоянию. В табл. 2.1 приведены характеристики перечисленных типов волн в зависимости от формы волнового фронта.

Таблица 2.1

**Характеристики акустических волн
в зависимости от формы волнового фронта**

Волновой фронт	Уравнение волны	Интенсивность
Плоский	$u(t, r) = u_0 \sin(\omega t - kr)$	$I = \text{const}$
Сферический	$u(t, r) = \frac{u_0}{r} \sin(\omega t - kr)$	$I \sim r^{-2}$
Цилиндрический	$u(t, r) = \frac{u_0}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr)$	$I \sim r^{-1}$

2.3. Упругие характеристики среды

Как отмечалось ранее, в твердых телах акустическое поле имеет гораздо более сложный вид, чем в жидкостях и газах, т. к. твердым телам присуща не только упругость объема, но и упругость формы (сдвиговая упругость). Вместо давления для твердых тел вводят понятие «напряжение» — силу, отнесенную к единице поверхности.

Различают нормальные (растягивающие или сжимающие) напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и тангенциальные (сдвиговые) напряжения σ_{xy} , σ_{yz} . Напряженное состояние твердого тела, таким образом, характеризуют тензором третьего ранга σ_{il} . Индексы i и l принимают значения осей координат x , y , z . Первый индекс указывает координату, в направлении которой действует сила, а второй — площадку (грань элементарного куба), перпендикулярную к направлению указанной в нем координаты, к которой эта сила приложена (рис. 2.8). Тензор напряжения симметричный ($\sigma_{il} = \sigma_{li}$), таким образом, содержит шесть независимых величин. В жидкостях и газах, где не существует упругости формы, тангенциальные компоненты тензора напряжения отсутствуют, а нормальные компоненты равны друг другу.

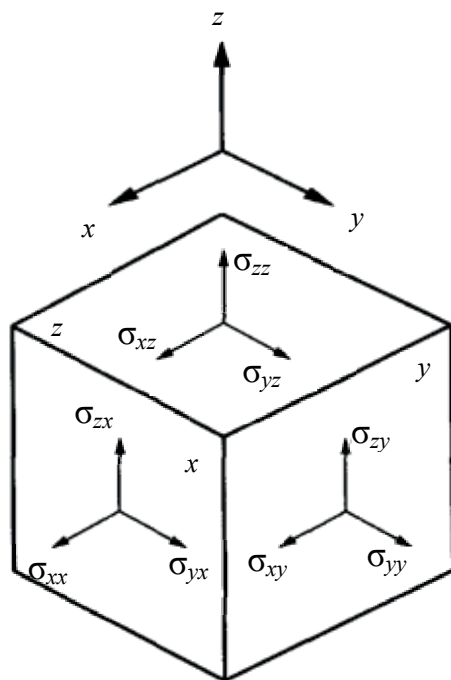


Рис. 2.8. Компоненты тензора напряжений

Наиболее часто колебания характеризуются деформацией — изменением взаимного расположения ∂u точек тела. Это изменение относят к первоначальному расстоянию между точками, в результате чего деформация становится безразмерной величиной. Если точки сдвинулись вдоль отрезка, их соединяющего (рис. 2.9, а), то это деформация растяжения-сжатия. Если точки сдвинулись перпендикулярно этому отрезку, то это деформация сдвига (рис. 2.9, б, в).

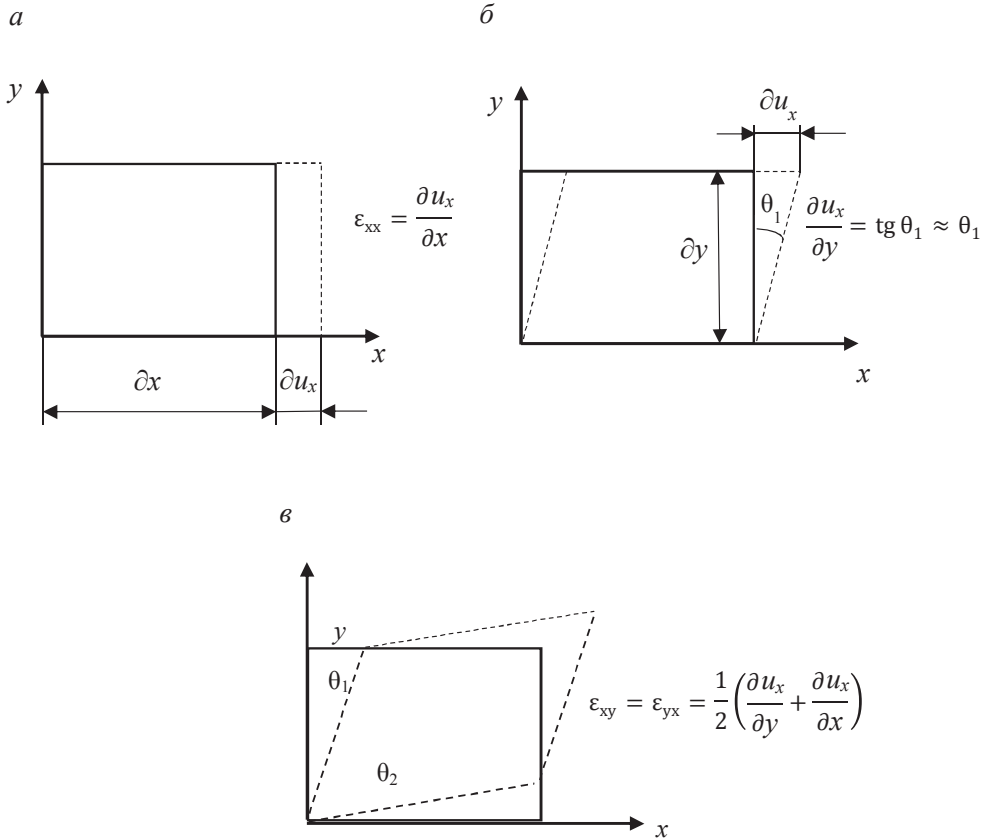


Рис. 2.9. Компоненты тензора деформации:

а — растяжения-сжатия; б — сдвига вдоль оси 0_x ; в — сдвига вдоль осей 0_x и 0_y

Деформацию записывают в виде тензора ϵ_{il} , аналогичного тензору напряжений. В тензоре деформации компоненты ϵ_{xx} и ϵ_{yy} — деформации растяжения-сжатия вдоль осей x , $\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$, 0_x и 0_y . Чтобы сде-

лять тензор деформаций симметричным, компонент ε_{xy} (рис. 2.9, в) записывают в виде

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right).$$

Величина $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ означает изменение объема $dx dy dz$ элементарного куба. Для жидкостей и газов деформации сдвига отсутствуют, а деформации сжатия-растяжения одинаковы по всем направлениям.

Пропорциональную зависимость между напряжениями и деформациями называют законом Гука:

$$\sigma = E \varepsilon,$$

где E — модуль упругости (модуль Юнга).

Волновое уравнение для твердого тела выводят путем применения второго закона Ньютона к элементарному объему $dx dy dz$. Разность сил, приложенных к его противоположным граням, приравнивают к произведению массы на ускорение. В результате получают для оси x

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}.$$

Аналогично можно записать уравнения для осей y и z . Подставляя вместо напряжений деформации согласно закону Гука, а также учитывая, что $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}$, получим

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = E \cdot \nabla^2 u,$$

где ∇^2 — оператор Лапласа.

Учитывая, что скорость распространения акустических волн определяется как $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, волновое уравнение окончательно примет вид

$$\boxed{\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \cdot \nabla^2 u}.$$

Волновое уравнение для одномерного случая приобретает более простой вид

$$\boxed{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}}.$$

Как уже было отмечено ранее, в твердых, жидких и газообразных средах существует упругость объема. Таким образом, во всех средах могут существовать колебания растяжения-сжатия. Волны с такими колебаниями носят название продольных. Продольная волна — волна, направление распространения которой совпадает с направлением движения частиц. При распространении продольной волны в среде образуются области растяжения и сжатия (рис. 2.10).

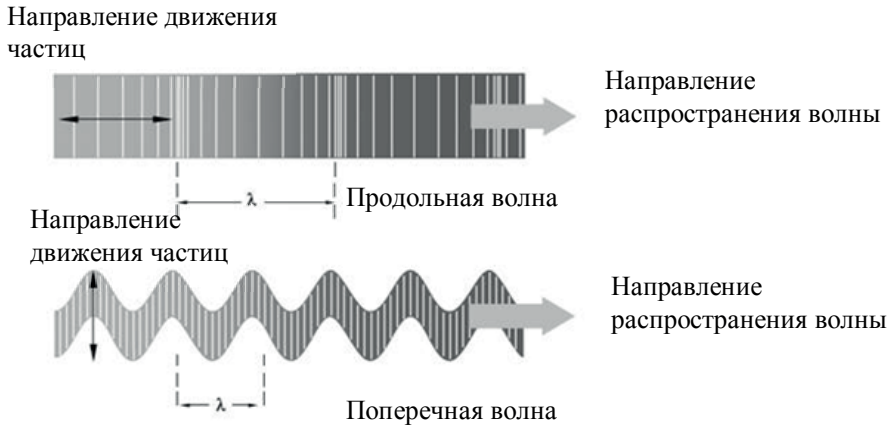


Рис. 2.10. Продольная и поперечная волны

В твердом теле существуют также волны сдвига (поперечные волны). Поперечная волна — волна, направление колебания частиц в которой перпендикулярно направлению распространения (рис. 2.10). В жидкостях и газах поперечных волн не существует, т. к. в этих средах отсутствует упругость формы.

Уравнения малых упругих колебаний в неограниченной изотропной среде для плоской продольной и плоской поперечной волн имеют вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_l^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \text{ и } \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_t^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

где c_l — скорость продольной волны;

c_t — скорость поперечной волны.

Скорость продольной волны можно рассчитать, если известны плотность материала ρ , модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}. \quad (2.1)$$

Коэффициент Пуассона — отношение изменения ширины стержня к изменению его длины, если растяжение производится по длине. Для металлов в нормальных условиях $\nu = 0,3$. Скорость продольной волны в металлах

$$c_l = 1,16\sqrt{E/\rho}.$$

Скорость поперечной волны определяется по модулю сдвига G и плотности материала ρ

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (2.2)$$

Отношение скоростей продольных и поперечных волн зависит от величины коэффициента Пуассона

$$\frac{c_l}{c_t} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}.$$

Для всех металлов при комнатной температуре значение коэффициента Пуассона близко к 0,3. В этом случае отношение скоростей составит

$$c_l \approx 0,55c_t.$$

Таким образом, скорости продольных и поперечных волн пропорциональны квадратному корню из отношения модуля упругости к плотности, т. е. они возрастают с увеличением упругости среды (которая показывает величину деформации при заданной нагрузке) и уменьшаются с увеличением плотности.

Уравнение, описывающее распространение волны в жидкой или газообразной среде, имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

При этом квадрат скорости распространения волны равен адиабатической производной

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \text{const}, \quad (2.3)$$

где p — давление;
 ρ — плотность.

Используя уравнение (2.1) и уравнение состояния идеального газа, получим выражение для скорости распространения волны

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где γ — показатель адиабаты;

R — универсальная газовая постоянная;

T — абсолютная температура;

M — молярная масса.

Показатель адиабаты является константой газовой среды, определяемой через удельные теплоемкости газа при постоянном давлении C_p и постоянном объеме C_v ,

$$\gamma = C_p / C_v$$

Продольную волну обычно возбуждают с помощью преобразователя, вызывающего деформацию растяжения-сжатия на части поверхности ОК, а поперечную волну — преобразователя, вызывающего деформацию сдвига. Однако гораздо чаще поперечную волну возбуждают с помощью продольной волны, наклонно падающей на поверхность ОК из внешней среды. Как будет показано в следующих параграфах, при этом происходит трансформация падающей продольной волны в поперечную.

Продольные и поперечные волны (их обобщенное название — «объемные волны») наиболее широко используют для контроля материалов. Важно отметить, что скорости продольных и поперечных волн определяются физическими свойствами среды.

В табл. 2.2 приведены значения скоростей продольных и поперечных волн в некоторых средах.

Таблица 2.2

Значения скоростей продольных и поперечных волн в некоторых средах

Скорость, м/с	Медь	Сталь	Оргстекло	Вода	Масло
C_l	4660	5900	2670	1490	1380
C_t	2260	3260	1121	—	—

2.4. Фазовая и групповая скорости. Дисперсия скорости

Волновой процесс есть процесс пространственного переноса энергии: перенос энергии происходит вследствие передачи импульса упругой де-

формации от одного участка среды к другому. Казалось бы, скорость переноса энергии должна совпадать со скоростью распространения волн. В действительности это совпадение не всегда осуществляется. Энергия передается со скоростью волны лишь при отсутствии дисперсии или же при наличии только одного ряда волн с некоторой определенной частотой.

Дисперсия — функциональная зависимость между частотой ω и волновым числом k

$$\omega = \omega(k).$$

Фазовая скорость — скорость движения волнового фронта. Для монохроматических плоских волн фазовая скорость гармонической волны определяется в соответствии с выражением

$$c_{ph} = \frac{\omega}{k}.$$

В линейных средах для малых возмущений $c_{ph} = \text{const}$.

На практике обычно имеют дело не с монохроматическими плоскими волнами, а с так называемым *волновым пакетом* — набором гармонических волн, распространяющихся с частотами в интервале $(\omega \pm \Delta\omega)$.

Групповая скорость — скорость переноса энергии группой волн

$$c_g = \frac{d\omega}{dk}.$$

Рассмотрим две гармонические волны, распространяющиеся с близкими по значению частотами ($\omega_1 \approx \omega_2$) и одинаковой амплитудой:

$$u_1(t, r) = u_0 \sin(\omega_1 t - k_1 r);$$

$$u_2(t, r) = u_0 \sin(\omega_2 t - k_2 r).$$

Из-за неодинаковой скорости распространения волн различной длины эти волны будут приходить в некоторую точку волнового поля с различными фазами, и в каждый момент времени результирующее смещение выбранной точки будет зависеть от соотношения фаз отдельных колебаний. Если эти фазы будут почти противоположны, то результирующее колебание будет невелико. В той точке, в которой фазы отдельных колебаний совпадут, результирующее колебание будет иметь максимально возможную амплитуду. При этом плотность энергии в данной точке среды будет, очевидно, максимальной. Но в следующий момент времени соотношение фаз изменится, и в связи с этим

уменьшится плотность энергии в этой точке. Будем называть точку с наибольшей плотностью энергии центром энергии группы волн. За счет непрерывно изменяющегося соотношения фаз отдельных колебаний центр энергии будет перемещаться в пространстве. Из-за интерференции картина распространения группы волн с близкими частотами будет иметь вид, показанный на рис. 2.11.

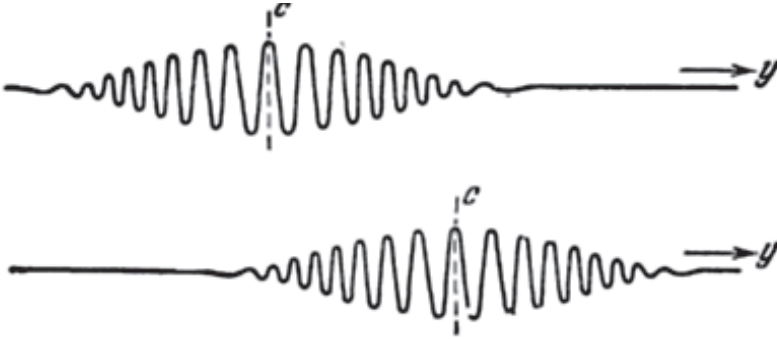


Рис. 2.11. Волновое поле группы волн с близкими частотами и перемещение центра энергии C

В результате наложения двух гармонических волн с одинаковыми амплитудами и близкими по значению частотами и волновыми числами получилась результирующая квазигармоническая волна

$$u_{\text{рез}}(t, r) = u_1 + u_2 = 2u_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}r\right) \sin(\omega t - kr)$$

Амплитуда результирующей волны изменяется по гармоническому закону

$$u_{\text{рез0}}(t, r) = 2u_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}r\right).$$

Отметим, что фазовая скорость результирующей волны несколько отличается от фазовых скоростей ее составляющих

$$c_{ph} = \frac{\omega}{k} \approx \frac{\omega_1}{k_1} \approx \frac{\omega_2}{k_2}.$$

Определим скорость изменения амплитуды результирующей волны:

$$\Delta\omega \cdot dt - \Delta k \cdot dx = 0;$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k};$$

$$c_g = \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk}.$$

Получим зависимость групповой скорости от фазовой

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{2\pi df}{2\pi d(\frac{1}{\lambda})} = \frac{d(\frac{c_{ph}}{\lambda})}{d(\frac{1}{\lambda})} = c_{ph} + \frac{1}{\lambda} \frac{dc_{ph}}{d(\frac{1}{\lambda})} = c_{ph} - \lambda \frac{dc_{ph}}{d\lambda}. \quad (2.4)$$

Согласно выражению (2.4) групповая скорость (скорость переноса энергии в пространстве) может оказаться больше или меньше фазовой в зависимости от типа дисперсии среды. Если среда не обладает дисперсией, волновой пакет ведет себя как монохроматическая волна, и фазовая скорость оказывается равной групповой. Иными словами, скорость переноса энергии в среде оказывается равной скорости распространения волны. Таким образом,

- 1) для сред без дисперсии $C_g = C_{ph}$, или $\frac{dC_{ph}}{d\lambda} = 0$;
- 2) для сред с аномальной дисперсией $C_g > C_{ph}$, или $\frac{dC_{ph}}{d\lambda} < 0$;
- 3) для сред с нормальной дисперсией $C_g < C_{ph}$, или $\frac{dC_{ph}}{d\lambda} > 0$.

2.5. Энергетические характеристики упругих волн

При прохождении волнового процесса в среде распространяется волна упругих деформаций, переносящая потенциальную энергию, и волна колебательных скоростей, осуществляющая перенос кинетической энергии.

Выделим малый объем среды и определим, как меняется со временем энергия, находящаяся в этом объеме.

Уравнение распространяющейся волны

$$u(t, r) = u_0 \sin(\omega t - kr).$$

Кинетическая энергия, соответствующая единице объема,

$$dW_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho \cdot dV}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \omega^2 \cos^2(\omega t - kr) \cdot dV.$$

Потенциальная энергия единицы объема, связанная с упругой деформацией среды,

$$dW_p = \frac{\varepsilon^2 E}{2} \cdot dV, \quad (2.5)$$

где ε — величина деформации;

E — модуль Юнга.

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial r} = -ku_0 \cos(\omega t - kr); \quad (2.6)$$

$$E = \rho c^2. \quad (2.7)$$

Учитывая соотношения (2.6) и (2.7), перепишем выражение (2.5):

$$dW_p = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \omega^2 \cos^2(\omega t - kr) \cdot dV.$$

Таким образом, в малом объеме упругой среды кинетическая и потенциальная энергии акустической волны оказываются равны друг другу

$$\boxed{dW_k = dW_p}.$$

Изменение значений кинетической и потенциальной энергий в волновом процессе происходит синфазно. Именно в этом заключается принципиальное отличие волнового процесса от простого колебательного движения, где кинетическая и потенциальная энергия изменяются в противофазе.

Выражение для полной энергии единицы объема

$$dW = dW_k + dW_p = \rho \omega^2 u_0^2 \cos^2(\omega t - kr) dV.$$

Объемная плотность энергии для гармонических волн определяется по соотношению

$$\Omega = \frac{dW}{dV} = \rho \omega^2 u_0^2 \cos^2(\omega t - kx).$$

Объемная плотность энергии представляет собой волну, распространяющуюся с частотой 2ω . Средняя за период плотность энергии гармонической волны

$$\langle \Omega \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \Omega(x, t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \rho \omega^2 u_0^2 \cos^2(\omega t - kx) dt = \frac{1}{2} \rho \omega^2 u_0^2.$$

Для характеристики направления потока энергии в данной точке акустического поля вводят векторную величину — плотность потока энергии — отношение потока Φ , проходящего через единицу площади dS перпендикулярно направлению распространения волны:

$$|\vec{U}| = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Поток энергии Φ рассчитывается как производная полной энергии распространения волны по времени

$$\Phi = \frac{dW}{dt}.$$

Тогда плотность потока энергии определяется в соответствии с выражением

$$|\vec{U}| = \frac{dW}{dt \cdot dS}.$$

Величину \vec{U} также называют *вектором Умова — Пойнтинга*. Его направление совпадает с направлением распространения волны

$$\vec{U} = \langle \Omega \rangle \cdot \vec{c}.$$

Интенсивность акустических волн — средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку перпендикулярно направлению распространения волны за единицу времени. Таким образом, интенсивность звуковой волны равна модулю вектора Умова — Пойнтинга и является скалярной величиной

$$I = |\vec{U}| = \langle \Omega \rangle c = \frac{1}{2} \rho c u_0^2 \omega^2.$$

Учитывая, что звуковое давление $P = \rho \omega u_0 c$, запишем:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{P^2}{2Z},$$

где Z — акустический импеданс.

При акустическом контроле приходится сравнивать между собой амплитуды (реже — интенсивности) акустических сигналов, причем они изменяются в очень широких пределах. В связи с этим для их сравнения используют логарифмические единицы — децибелы. Число децибел N , на которое сигнал интенсивностью I с амплитудой A от-

личается от некоторого исходного уровня с интенсивностью I_0 и амплитудой A_0 , равно, дБ,

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{A}{A_0}.$$

В активных методах АК за базовый сигнал (0 дБ) принимают импульс, посланный в ОК (зондирующий импульс). Он имеет максимальную амплитуду, поэтому амплитуды всех других импульсов выражаются в отрицательных децибелах, однако в УЗ-дефектоскопии знак минус принято опускать. Ниже приведены наиболее часто используемые отношения амплитуд импульсов A/A_0 , выраженные в децибелах:

50 %	6 дБ
25	12
10	20
1	40

2.6. Акустические свойства сред

Основные физико-механические свойства материала (плотность, упругость, структурное строение) определяют постоянные характеризующие распространение в среде упругих волн, т. е. акустические, свойства среды. Основными акустическими свойствами сред являются скорости продольных и поперечных волн, акустический импеданс и коэффициент затухания.

2.6.1. Скорость звука

Скорость звука как физическая константа упругой среды достаточно подробно рассматривалась в параграфе 2.3. Напомним некоторые особенности этого свойства среды.

Твердые изотропные вещества характеризуются скоростями распространения продольных и поперечных волн, определяемых по формулам (2.1) и (2.2). Эти две величины скорости можно использовать как пару упругих констант среды.

Анизотропные твердые вещества характеризуются большим количеством независимых значений скоростей звука и изменением скорости в зависимости от направления. В твердых кристаллических веществах вектор смещения в каждой волне обладает компонентами как

параллельными, так и перпендикулярными направлению распространения, т. е. каждая волна не будет чисто продольной или чисто поперечной. Изучением связи свойств кристаллов по распространению в них упругих волн занимается *кристаллоакустика*.

Зависимость скорости звука c от температуры t определяется по формуле

$$c = c_0 + K_c(t - t_0),$$

где c_0 — скорость звука при исходной температуре t_0 ;

K_c — температурный коэффициент скорости.

Температурный коэффициент скорости для газов положителен (например, у воздуха $+0,6$), а для жидкостей и твердых тел отрицателен (например, у спирта $-3,6$; у органического стекла -3). Таким образом, в твердых телах и жидкостях скорость акустических волн уменьшается с увеличением температуры.

2.6.2. Акустический импеданс

Акустический импеданс определяют как отношение звукового давления к колебательной скорости в бегущей волне

$$Z = P/v.$$

С физической точки зрения акустический импеданс характеризует степень сопротивления системы воздействию колебаний. В средах с большими потерями акустической энергии величина Z имеет комплексный характер, однако в большинстве случаев ее можно считать действительной и численно равной произведению плотности ρ на скорость звука c

$$Z = \rho c.$$

Эта величина характеризует среду, в которой распространяется волна. Ее называют волновым сопротивлением среды, или характеристическим импедансом. Поскольку скорости распространения продольных волн больше, чем поперечных, акустическое сопротивление среды при распространении продольных волн оказывается выше. Именно этим объясняется тот факт, что УЗ-дефектоскопию проводят главным образом с использованием поперечных волн. Величина волнового сопротивления применяется в расчетах по прохождению и отражению волн на границах различных сред, а также по излучению и при-

ему УЗ-колебаний. Для газообразных, жидких и твердых сред значения характеристического импеданса различаются на несколько порядков

$$Z_{\text{г}} : Z_{\text{ж}} : Z_{\text{тв}} = 1 : 10^3 : 10^5.$$

Эта особенность способствует тому, что полые дефекты в твердом теле при помощи ультразвука выявляются с гораздо большей эффективностью, чем заполненные (например, поры, заполненные шлаком).

2.6.3. Затухание УЗК

При распространении волн в реальных средах происходит уменьшение их амплитуды, что может быть вызвано дифракционным ослаблением — следствием неплоского волнового фронта, характерным для сферических и цилиндрических волн, а также затуханием волн в среде. При затухании уменьшается амплитуда всех типов волн, включая плоские волны. Таким образом, дифракционное ослабление — свойство волны, а затухание — свойство среды.

Затухание можно учесть путем введения дополнительного экспоненциального множителя в выражение для конкретного вида волн

$$A(r) = A_0 e^{-\delta r},$$

где $A(r)$ — амплитуда волны в произвольной точке среды;

A_0 — амплитуда волны в начальный момент времени;

δ — коэффициент затухания;

r — расстояние, пройденное волной.

Аналогичное выражение можно записать и для интенсивности волны

$$I(r) = I_0 e^{-2\delta r},$$

где $I(r)$ — интенсивность волны в произвольной точке среды.

Коэффициент затухания δ определяется как величина, обратная расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в e раз. Следовательно, коэффициент затухания имеет обозначение обратной длины (1/м) либо неперов на метр (Нп/м) и децибелов на метр (дБ/м), при этом $1 \text{ Нп/м} = 8,686 \text{ дБ/м}$.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния

$$\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{р}},$$

где $\delta_{\text{п}}$ — коэффициент поглощения;

$\delta_{\text{р}}$ — коэффициент рассеяния.

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно-распространяющейся волны.

Поглощение обусловлено вязкостью, упругим гистерезисом (т. е. различной упругой зависимостью при растяжении и сжатии) и теплопроводностью. Последний механизм поглощения связан с тем, что процесс распространения акустической волны считают адиабатическим. Расширение или сжатие элементарного объема сопровождается изменением температуры, но они настолько кратковременны, что процесс выравнивания температуры можно не учитывать. В действительности теплопроводность существует и способствует потере энергии колебаний.

Рассеяние происходит из-за наличия в среде неоднородностей (с отличными от среды волновым сопротивлением). Различие в волновых сопротивлениях приводит к отражению, преломлению и трансформации волн. Малые размеры и большое число неоднородностей обуславливают статистический характер рассеяния.

В гомогенных газах и жидкостях рассеяние отсутствует и затухание определяется только поглощением. Как было отмечено ранее, поглощение обусловлено внутренним трением (вязкостный эффект) и эффектами теплопроводности среды. В таком случае коэффициент поглощения δ_{Π} может быть представлен в виде суммы вязкостного $\delta_{\text{В}}$ и теплового $\delta_{\text{Т}}$ членов

$$\delta = \delta_{\text{В}} + \delta_{\text{Т}}.$$

В жидкостях поглощение происходит в основном за счет внутреннего трения, поэтому $\delta_{\text{В}} \gg \delta_{\text{Т}}$. В газах поглощение за счет трения и за счет эффектов теплопроводности в среде приблизительно совпадают, поэтому $\delta_{\text{В}} \approx \delta_{\text{Т}}$. При постоянной температуре коэффициент δ_{Π} определяется только частотой f . Для газов и жидкостей коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В этих случаях вводят коэффициент a , характеризующий поглощение в среде,

$$a = \frac{\delta_{\Pi}}{f^2}.$$

Учитывая, что поглощение обусловлено вязкостью среды и эффектами теплопроводности, можно представить коэффициент a суммой двух составляющих:

$$a = a_{\text{в}} + a_{\text{т}} = \frac{\delta_{\text{в}}}{f^2} + \frac{\delta_{\text{т}}}{f^2}.$$

В случаях, когда в жидкости наблюдается дисперсия скорости ультразвука, квадратичная зависимость $\delta_{\text{п}}$ от частоты нарушается.

В твердых телах коэффициент затухания определяется отдельно для продольных и поперечных волн: $\delta_{\text{л}}$ — коэффициент затухания для продольной волны; $\delta_{\text{п}}$ — коэффициент затухания для поперечной волны.

Большинство объектов неразрушающего контроля — поликристаллические твердые среды. При распространении акустических волн в таких средах происходит отражение, преломление и трансформация на границах зерен и неоднородностях структуры. Таким образом, затухание обусловлено как поглощением, так и рассеянием энергии. Коэффициент затухания в этом случае складывается из двух компонентов: коэффициента рассеяния $\delta_{\text{р}}$ и коэффициента поглощения $\delta_{\text{п}}$.

В твердых телах поглощение может быть вызвано:

- внутренним трением ($\delta_{\text{п}} \sim f$);
- теплопроводностью ($\delta_{\text{п}} \sim f^2$);
- упругими эффектами ($\delta_{\text{п}} \sim f$).

В зависимости от того, какие потери доминируют в среде, коэффициент поглощения пропорционален частоте (стекло, некоторые пластмассы) либо квадрату частоты (резина, многие пластмассы). Для одной и той же среды поглощение поперечных волн при $f = \text{const}$ меньше, чем продольных. Это обусловлено тем, что поперечные колебания не связаны с изменением объема и потери на теплопроводность отсутствуют.

Реальные твердые тела микронеоднородны. Каждое зерно поликристаллического тела представляет собой микрокристалл, обладающий анизотропией. Следствием упругой анизотропии является рассеяние акустических волн. Кроме того, на границах зерен при распространении колебаний происходит частичное отражение, преломление и трансформация типов волн (рис. 2.12).

Чем больше упругая анизотропия кристаллов, тем сильнее рассеяние. Перечислим некоторые металлы по мере возрастания в них анизотропии: вольфрам, алюминий, альфа-титан, альфа-железо (углеродистая сталь), гамма-железо (нержавеющая сталь), бета-титан, медь.

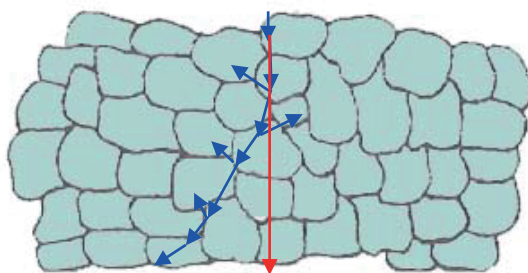


Рис. 2.12. Рассеяние УЗ-волны на границах зерен

Большое влияние на величину коэффициента рассеяния в средах оказывает соотношение среднего размера неоднородностей с длиной волны УЗ-колебаний. В металлах параметр среды, влияющий на рассеяние, — средний размер зерна \bar{D} . Зависимость коэффициента затухания от длины волны и среднего размера зерна представлена на рис. 2.13.

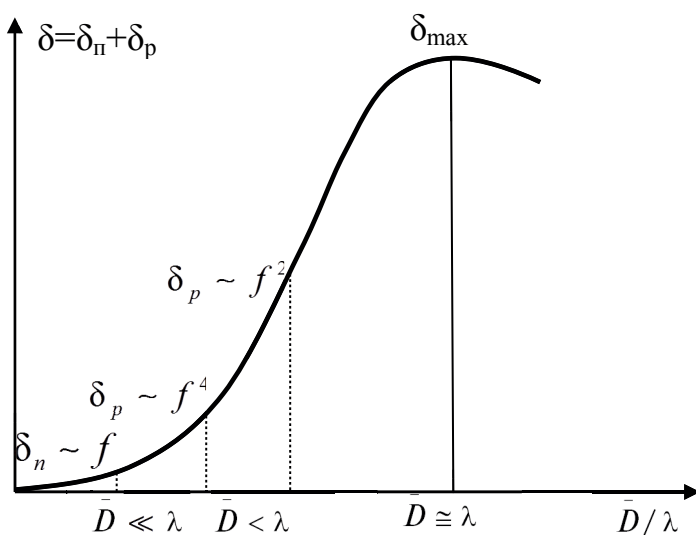


Рис. 2.13. Схематическая зависимость коэффициента затухания от соотношения среднего диаметра зерна и длины волны

При $\lambda \gg \bar{D}$ (область рэлеевского рассеяния) наблюдается увеличение коэффициента затухания за счет рассеяния волны на частицах, меньших по сравнению с длиной волны.

При $\lambda \approx (3...4) \bar{D}$ увеличение коэффициента затухания обусловлено поглощением за счет теплопроводности. Максимальное значение коэффициента затухания наблюдается при длине волны, сравнимой со средним размером зерна, что объясняет значительное затухание УЗ в грубозернистых материалах. При $\lambda \ll \bar{D}$ преобладают процессы поглощения, т. к. при увеличении размеров зерен уменьшается их эффективная поверхность и в предельном случае материал становится монокристаллическим.

Зависимость коэффициента затухания от частоты УЗ-колебаний и среднего размера зерна может быть представлена в виде соотношения

$$\delta = \delta + \delta_p = Af + Bf^4 \bar{D}^3,$$

где δ — коэффициент поглощения, $\delta = Af$; δ_p — коэффициент рассеяния, $\delta_p = Bf^4 \bar{D}^3$; A и B — коэффициенты пропорциональности, табулированные для каждого материала; f — частота; \bar{D} — средний диаметр зерна. Коэффициент B определяется по фактору анизотропии F_A и множителю C , не зависящему от размера зерна и анизотропии,

$$B = CF_A.$$

И поглощение, и рассеяние приводит к уменьшению амплитуды УЗ-сигнала, что ведет к определенным трудностям при УЗ-контроле. Для компенсации поглощения следует использовать более мощный зондирующий импульс, а также увеличивать усиление дефектоскопа. Рассеяние способствует не только ослаблению сигналов, отраженных от дна и дефектов, но и создает многочисленные шумовые импульсы на экране дефектоскопа, связанные с отражениями от граней кристаллов. Эти шумовые сигналы называют иногда «травой». В высокой «траве» может быть потерян полезный сигнал от дефекта. В борьбе с рассеянием не помогут увеличение мощности зондирующего импульса или усиления дефектоскопа, которые повлекут рост «травы». Помогает лишь переход к более низким частотам. Однако при этом из-за увеличивающейся ширины пучка и растущей длительности импульсов ухудшаются возможности выявления дефектов небольших размеров.

Основные акустические свойства некоторых практически важных материалов представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Акустические свойства материалов

Материал	ρ , г/см ³	c , 10 ³ м/с		$Z \cdot 10^6$, кг/м ² ·с	
		c_l	c_t	Z_l	Z_t
Алюминий	2,7	6,26	3,1	1,69	0,84
Вода	1,0	1,49	—	0,15	—
Воздух	0,0013	0,33	—	$4 \cdot 10^{-7}$	—
Масло трансформ.	8,9	4,66	—	0,9	—
Оргстекло	1,18	2,67	1,121	0,32	0,13
Сталь углеродистая	7,8	5,9	3,26	4,6	2,54
Медь	8,9	4,66	2,26	4,15	2,01

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий «колебание» и «волна». В чем состоит различие непрерывных и импульсных колебаний?
2. Что такое волновая поверхность и волновой фронт? По какому признаку различают плоские, сферические и цилиндрические волны?
3. Чем отличается характер распространения упругих колебаний в твердых телах и в газах?
4. Что такое дисперсия скорости? Какие среды являются бездисперсионными?
5. Поясните физический смысл фазовой и групповой скорости волн.
6. Определите энергетические характеристики упругих волн. Что такое вектор Умова — Пойнтинга?
7. Что такое децибелы? Для чего они используются в акустическом контроле?
8. Какие физические свойства упругих сред называют акустическими?

3. УПРУГИЕ ВОЛНЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ

В безграничных средах распространяются объемные продольные и поперечные волны. Они широко используются для контроля материалов, т. к. позволяют эффективно выявлять внутренние дефекты. Однако поверхностные и подповерхностные дефекты не дают обратного отражения и приводят к сильному рассеянию. В ограниченных средах могут возникать другие типы волн, которые эффективно используются для выявления дефектов в тонкостенных изделиях и вблизи поверхности.

3.1. Поверхностная волна Рэлея

Поверхностные волны — упругие волны, распространяющиеся вдоль поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другими средами и быстро затухающие с глубиной.

Волна Рэлея представляет собой комбинацию продольных и поперечных волн, распространяющихся вдоль поверхности с одинаковой скоростью. Приближенная формула для вычисления скорости волны Рэлея имеет вид

$$c_s = c_t \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}.$$

Поскольку практически для всех металлов при нормальных условиях характерно значение коэффициента Пуассона $\nu = 0,3$, то $c_s \approx 0,93c_t$.

Свойства волн Рэлея следующие.

1) Волны Рэлея могут распространяться на большие расстояния (порядка 1–2 м) вдоль поверхности твердого тела. Проникновение волн под поверхность твердого тела невелико: амплитуда рэлеевской волны имеет максимум на поверхности и уменьшается в 10 раз на глубине около λ_s — длины поверхностной волны. Волна Рэлея способна огибать небольшие препятствия и распространяться не только по плоским, но и искривленным поверхностям (рис. 3.1). На вогнутых участках поверхности волна испытывает дополнительное затухание (тем большее, чем меньше радиус кривизны) в результате излучения энергии вглубь изделия. На вогнутых участках скорость волны уменьшается, а на выпуклых — увеличивается.

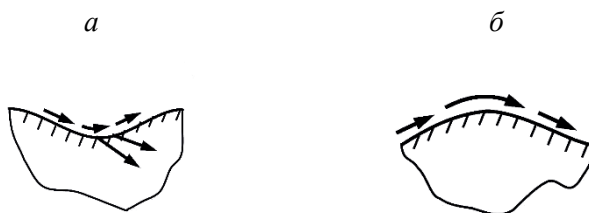


Рис. 3.1. Распространение поверхностной волны Рэлея:
а — вдоль выпуклой поверхности; б — вдоль вогнутой поверхности

2) При распространении рэлеевской волны вдоль границы твердого тела частицы движутся по эллиптическим траекториям (рис. 3.2) с большой осью, перпендикулярной границе (волна TV-типа). Выпуклость эллипса с глубиной увеличивается.

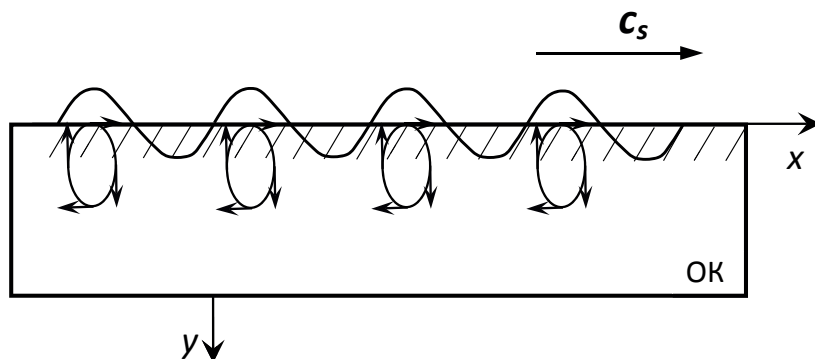


Рис. 3.2. Эллиптическая поляризация поверхностной волны Рэлея

3) Рэлеевские волны чувствительны к микрорельефу поверхности. Такие волны плохо распространяются по шероховатым поверхностям, поскольку испытывают многократное рассеяние, однако при хорошей обработке поверхности могут применяться для выявления поверхностных трещин.

4) При резком изменении профиля поверхности волны Рэлея испытывают частичное отражение, частичное прохождение через препятствие и частичную трансформацию в объемные волны. Например, при падении волны на двугранный угол примерно 51 % энергии волны расходуется на прохождение, 37 % — на отражение и 12 % — на трансформацию (рис. 3.3).

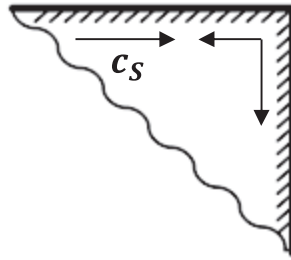


Рис. 3.3. Падение волны Рэлея на двугранный угол

На рис. 3.4 приведена зависимость амплитуды тангенциальных u_x и нормальных u_y смещений от глубины распространения волны h . Для тангенциальных смещений существует максимум, т. к. на свободной поверхности твердого тела напряжения частично релаксированы. Нормальные смещения локализованы в очень тонком слое и даже меняют знак (это следствие эллиптической поляризации).

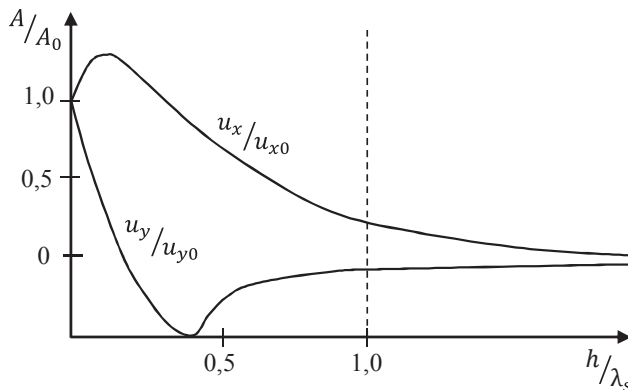


Рис. 3.4. Зависимость амплитуд тангенциальных u_y и нормальных u_x смещений от глубины распространения волны h

Возбуждение волны Рэлея. Поверхностную рэлеевскую волну возбуждают с помощью продольной волны, наклонно падающей на границу раздела сред (рис. 3.5).

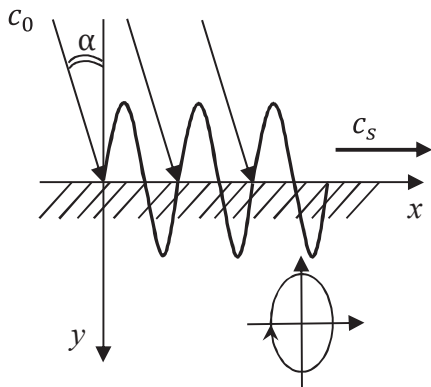


Рис. 3.5. Возбуждение волны Рэлея

Угол падения продольной волны определяют из соотношения

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{c_0}{c_s} \right),$$

где c_0 — скорость продольной волны.

Применение волн Рэлея. Волны Рэлея применяются для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов. Волны избирательно реагируют на дефекты в зависимости от глубины их залегания. Дефекты, расположенные на поверхности, дают максимальное отражение, а на глубине, превышающей λ_s , практически не выявляются.

3.2. Головные волны

Головные волны — волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твердого тела со скоростью продольной волны ($c_h \approx c_l$). Волны данного типа распространяются в подповерхностном слое. Зависимость амплитуды головной волны A от глубины распространения h в стали представлена на рис. 3.6. Максимум амплитуды головной волны приходится на некоторую глубину под поверхностью

(для стали — 6 мм). При дальнейшем увеличении глубины амплитуда головной волны уменьшается вследствие переизлучения энергии в объем твердого тела.

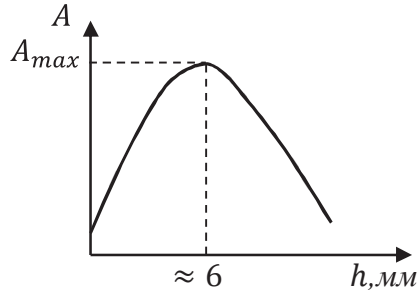


Рис. 3.6. Зависимость амплитуды головной волны от глубины распространения в стали

Свойства головных волн таковы:

- 1) головные волны являются совокупностью поверхностно-продольной и генерирующей ее объемно-продольной волны;
- 2) в отличие от рэлеевских волн, головные волны не чувствительны к поверхностным дефектам;
- 3) головные волны имеют наибольшую скорость распространения среди всех типов акустических волн.

Возбуждение головных волн. Головную волну возбуждают с помощью продольной волны, наклонно падающей на границу раздела сред (рис. 3.7).

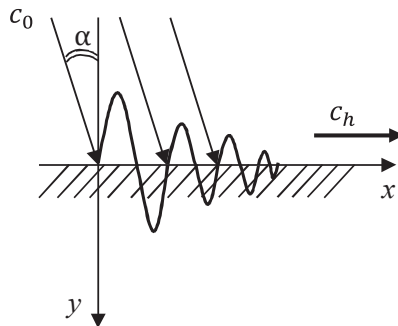


Рис. 3.7. Возбуждение головной волны

От границы раздела сред расходится пучок продольных волн, один из лучей которого распространяется вдоль поверхности и является головной волной.

Угол падения продольной волны определяют из соотношения

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{c_0}{c_h} \right),$$

Применение головных волн. С помощью головных волн выявляются подповерхностные дефекты на глубине 1–6 мм. Контроль тонких изделий затруднен из-за поперечных волн, которые, отражаясь от противоположной поверхности изделия, дают ложные сигналы.

3.3. Нормальные волны

Нормальная волна — волна в ограниченной среде (слое, стержне), представляющая собой бегущую волну в направлении распространения и стоячую волну в поперечном направлении.

3.3.1. Волны Лэмба

Волна Лэмба — разновидность нормальных волн в слое с двумя свободными поверхностями (пластины), характеризующаяся волновым механизмом распространения и возбуждаемая при определенных соотношениях между толщиной слоя и частотой.

Волны Лэмба могут возникать как в жидких, так и в твердых слоях. Обязательным условием для возбуждения волны Лэмба является то, что толщина слоя должна быть соизмерима с длиной объемной волны в слое.

Рассмотрим механизм возбуждения волны Лэмба в жидком слое (рис. 3.8). На слой жидкости толщиной h падает под углом α плоская продольная волна. На границе раздела сред волна преломляется под углом γ . AD — фронт падающей волны; CB — фронт преломленной волны. Преломленная волна многократно отражается от границ пластин. В точке B происходит интерференция падающей и отраженной волн. При определенном угле падения α отраженная от нижней поверхности слоя волна совпадает по фазе с прямой волной, падающей в точке B , что и является условием возникновения волны Лэмба, распространяющейся вдоль слоя с фазовой скоростью c_{ph} .

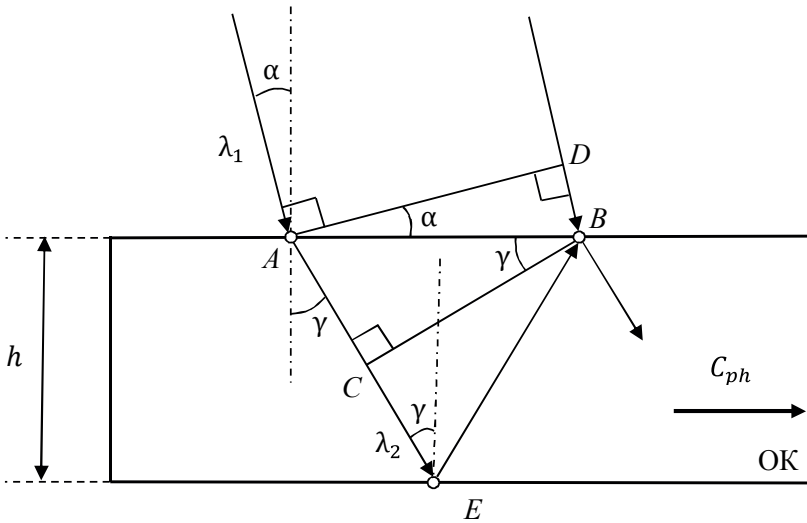


Рис. 3.8. Возбуждение волны Лэмба

Выведем соотношение между углом преломления падающей волны и толщиной слоя, определяющее условие возникновения волн Лэмба. Определим путь преломленной волны:

$$AEB = \frac{2h}{\cos(\gamma)}. \quad (3.1)$$

Разделим обе части уравнения (3.1) на длину преломленной волны λ_2 , тем самым получим число длин волн, укладывающихся на пути AEB :

$$\frac{AEB}{\lambda_2} = \frac{2h}{\cos(\gamma)\lambda_2}.$$

Запаздывание фазы преломленной волны на пути AC

$$\frac{AC}{\lambda_2} = \frac{2h \operatorname{tg}(\gamma) \sin(\gamma)}{\lambda_2}.$$

Запаздывание фазы падающей волны на участке DB

$$\frac{DB}{\lambda_1} = \frac{2h \operatorname{tg}(\gamma) \sin(\alpha)}{\lambda_1}.$$

На участке AC должно укладываться столько длин волн, сколько укладывается на участке DB . Разность фаз падающей и отраженной волн

$$\begin{aligned}\varphi &= 2\pi \left(\frac{AEB}{\lambda_2} - \frac{DB}{\lambda_1} \right) = 2\pi \left(\frac{AEB}{\lambda_2} - \frac{AC}{\lambda_2} \right) = \\ &= 2\pi \left(\frac{2h}{\cos(\gamma)\lambda_2} - \frac{2htg(\gamma)\sin(\gamma)}{\lambda_2} \right).\end{aligned}$$

Условие совпадения фаз достигается при $\varphi = 2\pi n$. В таком случае условие установления резонанса колебаний для случая наклонного падения первичной волны

$$h \cos(\gamma) = \frac{n\lambda_2}{2}.$$

При нормальном падении волны $\gamma = \alpha = 0$, $\cos \gamma = \cos \alpha = 1$, тогда условие резонанса имеет вид

$$h = \frac{n\lambda_2}{2}.$$

Таким образом, волна в слое является результатом интерференции волн, идущих в разных направлениях.

Найдем выражение для фазовой скорости нормальной волны, распространяющейся вдоль оси. В соответствии с законом Снеллиуса

$$\frac{\sin(\alpha)}{c_1} = \frac{\sin(\gamma)}{c_2} = \frac{1}{c_{ph}}.$$

Отсюда фазовая скорость волны Лэмба

$$c_{ph} = \frac{c_2}{\sin(\gamma)} = \frac{c_2}{\sqrt{1 - (n\lambda_2 / 2h)^2}}.$$

Фазовая скорость волны Лэмба зависит от следующих факторов:

- 1) скорости звука в материале пластины;
- 2) частоты колебаний;
- 3) толщины слоя.

Зависимость фазовой скорости лэмбовских волн от частоты отражает отличительную особенность этого вида волн — *дисперсию скорости*. Система дисперсионных кривых лэмбовских волн приведена на рис. 3.9.

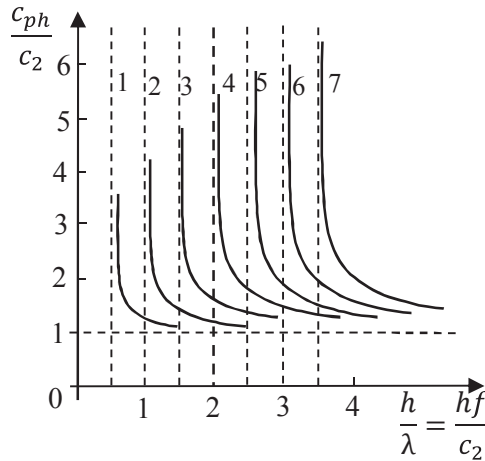


Рис. 3.9. Система дисперсионных кривых для волн Лэмба в жидком слое

Особенности дисперсионной зависимости следующие.

- 1) В тех точках, где $\frac{h}{\lambda_2} = \frac{2n+1}{2}$, $c_{ph} \rightarrow +\infty$. Физически это означа-

ет, что вся поверхность колеблется одновременно, т. е. возникает резонанс по толщине.

- 2) $c_{ph} \rightarrow c_2$ при $\frac{h}{\lambda_2} \rightarrow +\infty$. Данное явление существенно для пла-

стин большой толщины и при работе на высокой частоте. Резонанс отсутствует, и волна Лэмба превращается в объемную продольную волну, распространяющуюся вдоль слоя.

Существует несколько типов волн Лэмба. Моды, колебания которых симметричны относительно оси пластины, называют *симметричными* (обозначение s_i). Моды, колебания которых ассиметричны относительно оси, называют *ассиметричными* (обозначение a_i). Схематично колебания частиц в модах Лэмба показаны на рис. 3.10. В симметричных модах смещения в эквивалентных точках по разные стороны от оси пластины направлены противоположно, а в ассиметричных модах — в одну сторону.

Для твердых тел волновая картина усложняется, т. к. в твердых телах помимо продольных волн имеются поперечные волны. Но суть явления (резонанс объемных волн при наклонном падении) сохраняется. Основные свойства нормальных волн — дисперсия, многомодовость — проявляются в еще большей степени (рис. 3.11).

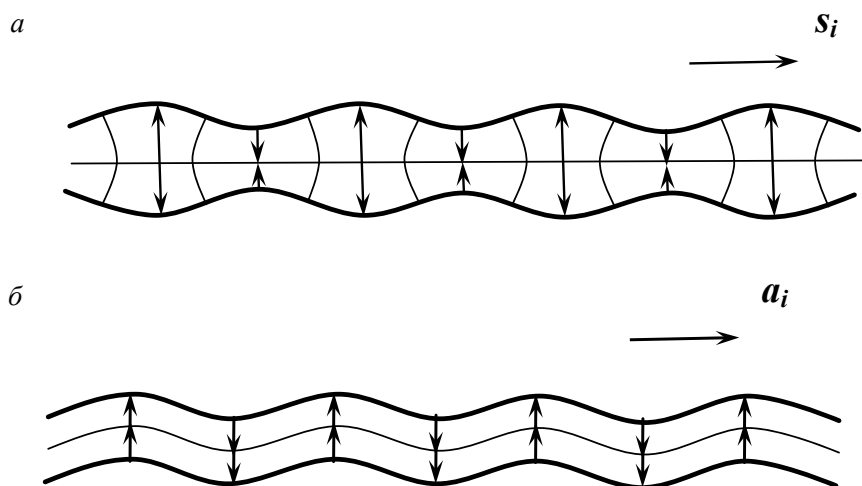


Рис. 3.10. Колебания симметричной (а) и асимметричной (б) моды волны Лэмба

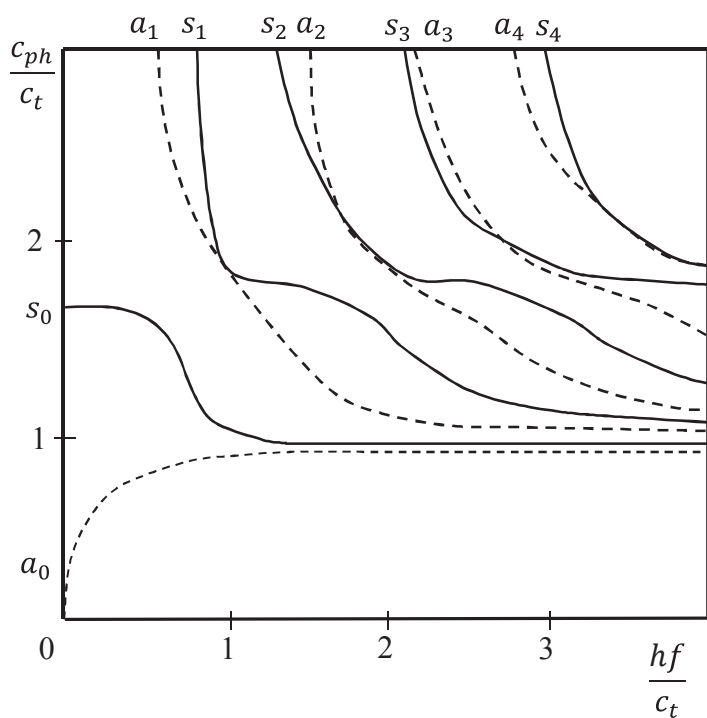


Рис. 3.11. Система дисперсионных кривых для волн Лэмба в твердом теле

Система дисперсионных кривых нормальных волн в твердом теле имеет моды a_0 и s_0 , которые существуют при любой частоте и толщине: a_0 — изгибная волна (антисимметричная мода), s_0 — волна растяжения-сжатия (симметричная мода). При $h \rightarrow 0$ мода s_0 имеет ограниченное значение, а мода a_0 не возбуждается. При $h \gg 0$ все моды в твердом слое нормальных волн переходят в поверхностную волну Рэлея (колебания частиц совершаются только вблизи поверхности). При $h \rightarrow +\infty$ моды a_0 и s_0 переходят в две поверхностные рэлеевские волны по двум плоскостям пластины, но в одинаковой фазе. Моды первого и более высоких порядков возникают при определенных критических значениях толщины, которые соответствуют резонансным частотам продольных и поперечных волн.

Возбуждение волн Лэмба. Волну Лэмба возбуждают с помощью продольной волны, падающей на границу раздела сред под углом α , который рассчитывается по фазовой скорости волны Лэмба c_{ph} , определяемой по дисперсионным кривым,

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{c_0}{c_{ph}} \right).$$

При использовании импульсного режима длительность импульса должна превышать время распространения волны. В противном случае интерференция падающей и отраженной волн не произойдет, и стоячая волна в поперечном сечении не возникнет.

Применение волн Лэмба. Поскольку волны Лэмба распространяются в твердом слое на большие расстояния без затухания (как в волноводе), их используют для контроля тонких листов, оболочек и труб. Изменение сечения волновода или появление в нем неоднородностей и дефектов будет вызывать отражение волн Лэмба.

При достаточно больших толщинах пластины может произойти трансформация нормальных волн Лэмба в поверхностные волны Рэлея, что приведет к ошибкам при расшифровке результатов контроля. Эти явления следует учитывать при контроле изделий сложной формы.

Волны Лэмба используются для контроля продольных, поперечных дефектов, а также для контроля изменения толщины.

3.3.2. Волны в стержнях (волны Порхгаммера)

Волны Порхгаммера — особый тип нормальных волн. Они возникают в стержнях, диаметр которых соизмерим с длиной волны. Волны Порхгаммера могут быть симметричными, антисимметричными, а также крутильными (рис. 3.12). Крутильные волны не относятся к нормальным, вид колебаний в них — поворот вокруг оси некоторого стержня или трубы.

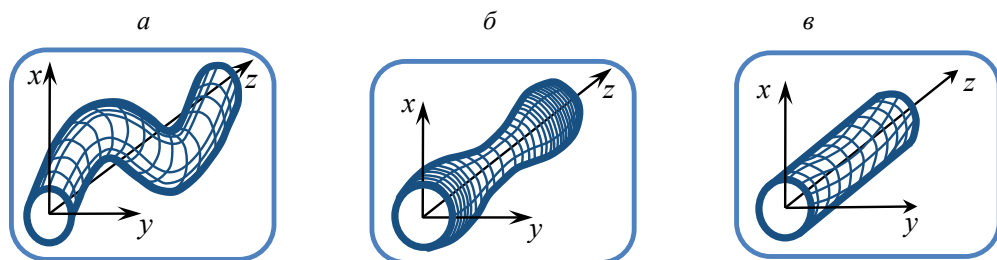


Рис. 3.12. Типы колебаний волн Лэмба:

a — антисимметричная волна; b — симметричная волна; v — крутильная волна

На рис. 3.13 представлена система дисперсионных кривых для волн Порхгаммера.

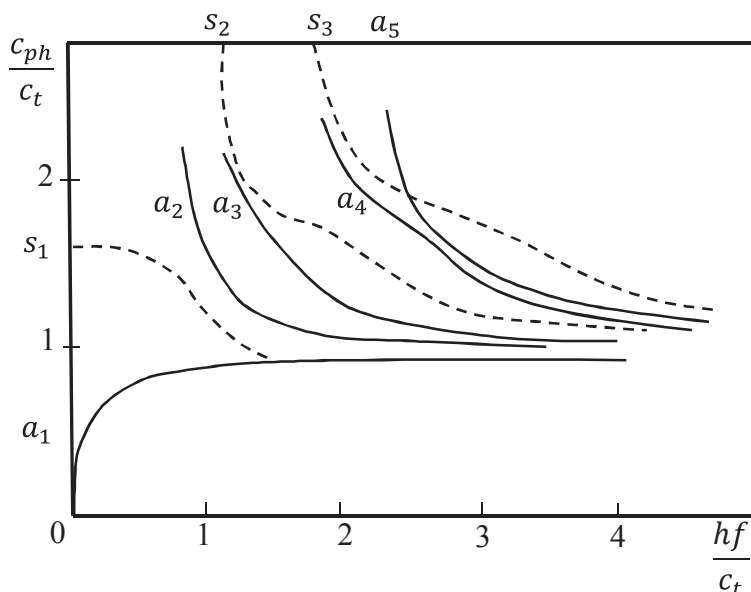


Рис. 3.13. Система дисперсионных кривых для волн Порхгаммера

Особенности дисперсионных кривых состоят в следующем.

Картина дисперсионных кривых сложнее, чем для волн в пластинах:

- 1) число мод значительно увеличилось;
- 2) появились четные моды, обусловленные наличием крутильных волн, которые не имеют аналогов среди волн в пластинах;
- 3) критические значения, при которых фазовая скорость стремится к бесконечности, не означают целого числа полуволн, как у волн в пластинах, и вычисляются по более сложным формулам.

Если диаметр стержня мал, т. е. $d \rightarrow 0$, то существуют только моды a_1 и s_1 , что позволяет применять волны Порхгаммера для контроля прутков и проволоки. В этом случае фазовая и групповая скорости

моды s_1 стремятся к значению $\sqrt{\frac{E}{\rho}} = C_l = C_t$. Для моды a_1 данные ско-

рости близки к нулю. При этом выбирают такой тип колебаний, который легко возбуждается и обеспечивает хорошую выявляемость дефектов. Наиболее удобна мода S_1 , обладающая наименьшей дисперсией.

Возбуждение волн Лэмба. Различные моды волн Порхгаммера возбуждают с помощью продольной волны, падающей на границу раздела сред под углом α , который рассчитывается по фазовой скорости волны Порхгаммера c_{ph} , определяемой по дисперсионным кривым,

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{c_0}{c_{ph}} \right).$$

Без использования дисперсионных кривых условия возбуждения стержневых волн определяют по формуле

$$fd = kc_t,$$

где k — нормированный коэффициент (рекомендован ряд значений 0,83; 2,5; 3,8; 5,25,...). Выбирая меньшее значение коэффициента k , можно определить легковозбуждаемые низшие моды колебаний. Далее рассчитывают фазовую скорость:

$$c_{ph} = 1,41c_t.$$

Угол падения первичной волны определяют из закона Снеллиуса.

Основные параметры вышеуказанных типов упругих волн в ограниченных средах приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Различные типы волн и значения их скоростей

Среда	Тип волны	Характеристика волны	Скорость распространения
Жидкость или газ	Растяжения-сжатия (продольные)	Периодические растяжения и сжатия среды	$c_l = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$
Безграничное твердое тело	Продольные	Деформации разжатия-сжатия	$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$
	Поперечные	Сдвиговые деформации	$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0,55c_l$
Поверхность полубезграничного твердого тела	Поверхностные волны Рэлея	Волна распространяется по поверхности	$c_s = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} c_t \approx 0,93c_t$
	Головные волны	Быстро затухают вдоль поверхности (из-за переизлучения)	$c_h = c_t$
Бесконечная пластина толщиной h	Нормальные несимметричные волны Лэмба (изгибные)	Изгиб со сдвигом $\lambda \gg h$	$c_{Pa} \approx \frac{\pi h}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}$
	Нормальные симметричные волны Лэмба (расширение-сжатие)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров $\lambda \gg h$	$c_{PS} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$
Бесконечный стержень диаметром d ($\lambda \gg d$)	Изгиба	Изгиб со сдвигом	$c_{Ba} \approx \frac{\pi d}{2\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
	Продольные	Растяжение-сжатие	$c_{BS} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Контрольные вопросы

1. Дайте определение волны Рэлея. Охарактеризуйте ее свойства и особенности применения в АК.
2. Как особенности микро- и макрорельефа поверхности влияют на характер распространения волн Рэлея?
3. Назовите свойства и условия возбуждения головных волн.
4. Что называют нормальной волной? Перечислите ее основные свойства.
5. Каковы особенности распространения волн Лэмба в жидкостях и твердых телах? Назовите области применения волн Лэмба.
6. При каких условиях возникают волны Порхгаммера? В чем состоит их отличие от волн Лэмба?

4. ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ СРЕД

4.1. Коэффициенты отражения и прохождения

При прохождении границ раздела сред акустические волны испытывают не только отражение и преломление, но и трансформацию волн одного типа в другой. Отражением называется изменение направления распространения волны на границе раздела, при котором волна не переходит в другую среду. Преломлением называется изменение направления и (или) скорости волны на границе раздела, при котором волна переходит в другую среду. Трансформацией называют преобразование типа или поляризации волн, происходящее на границе раздела двух сред.

Рассмотрим простейший случай нормального падения волны на границу двух протяженных сред (рис. 4.1). В этом случае все три волны — падающая, отраженная и преломленная — направлены вдоль прямой, перпендикулярной к поверхности. Трансформация волн при нормальном падении отсутствует.

Для количественной характеристики амплитуд и интенсивностей отраженных и преломленных волн вводят коэффициенты отражения и прохождения.

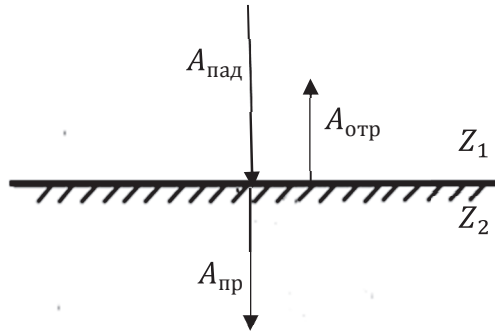


Рис. 4.1. Прохождение волны через границу раздела двух сред:

$A_{\text{пад}}$, $A_{\text{пр}}$, $A_{\text{отр}}$ — амплитуды падающей, прошедшей и отраженной волн;
 Z_1 , Z_2 — акустические импедансы сред

Коэффициентом отражения по амплитуде R называется отношение амплитуд отраженной и падающей волн

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}}.$$

Коэффициентом прохождения по амплитуде D называется отношение амплитуды прошедшей и падающей волн

$$D = \frac{A_{\text{прош}}}{A_{\text{пад}}}.$$

Указанные коэффициенты можно определить, зная акустические характеристики сред. При падении волны из среды 1 в среду 2 коэффициент отражения R определяется как

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (4.1)$$

где Z_1 , Z_2 — акустические импедансы сред 1 и 2 соответственно.

При падении волны из среды 1 в среду 2 коэффициент прохождения обозначается D_{\downarrow} и определяется как

$$D_{\downarrow} = \frac{A_{\text{прош}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}.$$

При падении волны из среды 2 в среду 1 коэффициент прохождения обозначается D_{\uparrow} и определяется как

$$D_{\uparrow} = \frac{A_{\text{прош}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}.$$

Из формулы (4.1) для коэффициента отражения видно, что чем больше отличаются акустические импедансы сред, тем большая часть энергии звуковой волны отразится от границы раздела двух сред. Этим определяется как возможность, так и эффективность выявления нарушений сплошности материала (включений среды с акустическим сопротивлением, отличающимся от сопротивления контролируемого материала).

Именно из-за различий в значениях коэффициентов отражения шлаковые включения выявляются значительно хуже дефектов таких же размеров, но с воздушным заполнением. Отражение от несплошности, заполненной газом, приближается к 100 %, а для несплошности, заполненной шлаком, этот коэффициент значительно ниже.

При нормальном падении волны на границу двух протяженных сред соотношение между амплитудами падающей, отраженной и прошедшей волны определяется по формуле

$$A_{\text{пад}} \neq A_{\text{отр}} + A_{\text{прош}}.$$

Энергия же падающей волны в случае нормального падения на границу двух протяженных сред распределяется между отраженной и прошедшей волной по закону сохранения.

Помимо коэффициентов отражения и прохождения по амплитуде, используются также коэффициенты отражения и прохождения по интенсивности.

Коэффициент отражения по интенсивности \tilde{R} есть отношение интенсивностей отраженной и падающей волн. При нормальном падении волны

$$\tilde{R} = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = R_{\uparrow} R_{\downarrow} = R^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2,$$

где R_{\uparrow} — коэффициент отражения при падении из среды 2 в среду 1; R_{\downarrow} — коэффициент отражения при падении из среды 1 в среду 2.

Коэффициент прохождения по интенсивности \tilde{D} — отношение интенсивностей прошедшей и падающей волн. При падении волны по нормали

$$\tilde{D} = \frac{I_{\text{прош}}}{I_{\text{пад}}} = D_{\uparrow} D_{\downarrow} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2},$$

где D_{\uparrow} — коэффициент прохождения при падении из среды 2 в среду 1; D_{\downarrow} — коэффициент прохождения при падении из среды 1 в среду 2.

Направление падения волны не влияет на значения коэффициентов отражения и прохождения по интенсивности. Закон сохранения энергии через коэффициенты отражения и прохождения записывается следующим образом:

$$\boxed{R^2 + D = 1}.$$

При наклонном падении волны на границу раздела сред возможна трансформация волны одного типа в другой. Процессы отражения и прохождения в этом случае характеризуются несколькими коэффициентами отражения и прохождения в зависимости от типа падающей, отраженной и прошедшей волн. Коэффициент отражения в этом виде имеет обозначение R_{ij} (i — индекс, указывающий на тип падающей волны; j — индекс, указывающий на тип отраженной волны). Возможны случаи R_{\perp} , R_{\parallel} . Коэффициент прохождения обозначается D_{ij} (i — индекс, указывающий на тип падающей волны; j — индекс, указывающий на тип прошедшей волны). Возможны случаи D_{\perp} , D_{\parallel} . Закон сохранения энергии через коэффициенты отражения и прохождения при наклонном падении

$$\boxed{R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2 + \widetilde{D}_{\perp} + \widetilde{D}_{\parallel} = 1}.$$

4.2. Обобщенный закон Снеллиуса

Падающая на границу двух полубезграницных сред акустическая волна частично проходит через границу, а частично отражается от нее. При этом может происходить трансформация типов волн. Пусть, для определенности, падающая из среды 1 волна имеет продольную поляризацию (рис. 4.2). В общем случае от границы раздела отражаются две волны — продольная и поперечная, преломляются и проходят в среду 2 тоже две волны — одна продольная, другая поперечная.

Введем углы падения α , отражения β и преломления γ . Каждый из этих углов измеряется между направлением распространения соответствующей волны и перпендикуляром, восстановленным в точке падения. Для падающей, отраженных и преломленных волн отношение синуса угла (между направлением распространения и нормалью к поверхности раздела) к скорости волны есть величина постоянная. Это закон отражения и преломления, или закон Снеллиуса.

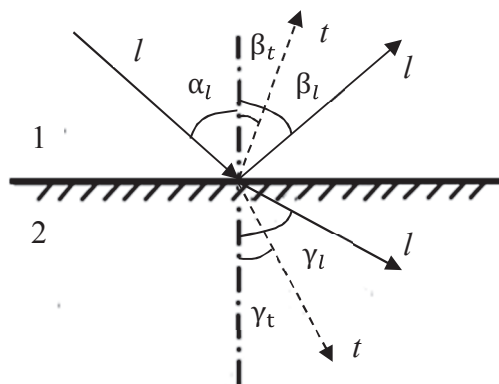


Рис. 4.2. Отражение и преломление акустической волны на границе двух твердых сред:

l, t — продольная и поперечная волны $\alpha_l, \beta_l, \beta_t, \gamma_l, \gamma_t$ — соответствующие углы падения, отражения и преломления

Математическое выражение закона Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha_l}{c_l} = \frac{\sin \beta_l}{c_l} = \frac{\sin \beta_t}{c_t} = \frac{\sin \gamma_l}{c'_l} = \frac{\sin \gamma_t}{c'_t}, \quad (4.2)$$

где c_l — скорость падающей и отраженной продольных волн (падающая волна может быть и поперечной); c_t — скорость отраженной поперечной волны; c'_l — скорость прошедшей продольной волны; c'_t — скорость прошедшей поперечной волны.

В общем виде закон Снеллиуса можно записать следующим образом:

$$\frac{\sin \theta_i}{c_i} = \text{const},$$

где θ_i — угол между направлением волны и нормалью к поверхности раздела.

Поскольку скорости продольных падающей и отраженной волн в первой среде равны, то из формулы (4.2) равны и углы падения и отражения $\alpha_i = \beta_i$. Чем больше скорость прошедшей (преломленной) волны, тем больше угол преломления. Поэтому преломленная волна отклонена от нормали больше, чем поперечная.

4.3. Критические углы

Если одна или обе среды — твердые тела, то из закона синусов вытекает возможность существования нескольких критических углов. Представим ситуацию, когда падающая волна продольная (c_l — скорость продольной падающей волны). В этом случае во второй среде может возникнуть два типа волн — прошедшая продольная со скоростью c_l' и прошедшая поперечная со скоростью c_t' (см. рис. 4.2). При этом возможна ситуация, когда $c_l < c_t'$. Тогда при увеличении угла падения α увеличивается и угол преломления γ , и при определенном значении угла падения α^I преломленная продольная волна сольется с границей раздела сред (рис. 4.3, а). Таким образом, продольная волна во второй среде превращается в головную волну, распространяющуюся в поверхностном слое.

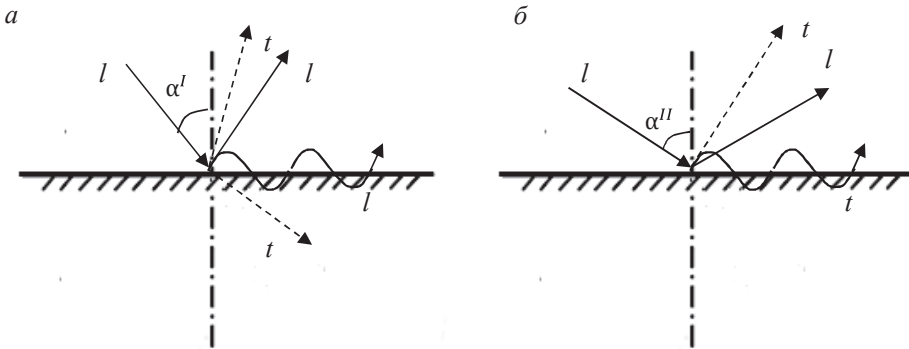


Рис. 4.3. Трансформация падающей продольной волны в головную (а) и рэлеевскую (б) на границе раздела двух сред

Головная волна может быть использована для целей дефектоскопии. Такой угол падения α^I называется *первым критическим углом* и определяется из условия

$$\frac{\sin \alpha^I}{c_l} = \frac{1}{c_l'}.$$

При углах падения больше либо равных α^I во вторую среду проходят только поперечные волны. Первый критический угол для границы оргстекло — сталь $\alpha^I = 27,5^\circ$.

При выполнении условия $c_l < c_l'$ может возникнуть ситуация, когда при увеличении угла падения α с границей раздела сред сольется преломленная поперечная волна (рис. 4.3, б). Такой угол падения α^{II} называется *вторым критическим углом*. Его значение рассчитывается из условия

$$\frac{\sin \alpha^{II}}{c_l} = \frac{1}{c_l'}.$$

При втором критическом угле энергия падающей продольной волны переходит в энергию поверхностной волны Рэлея. Скорость такой волны $c_s = 0,93c_l$. Второй критический угол для границы оргстекло — сталь имеет значение $\alpha^{II} = 57,5^\circ$.

Третий критический угол существует, если из твердого тела на границу раздела сред падает поперечная волна со скоростью c_t . Поскольку $c_t < c_l$, возможна ситуация, когда при определенном значении угла падения α^{III} отраженная продольная волна сольется с поверхностью, превратившись в головную волну (рис. 4.4).

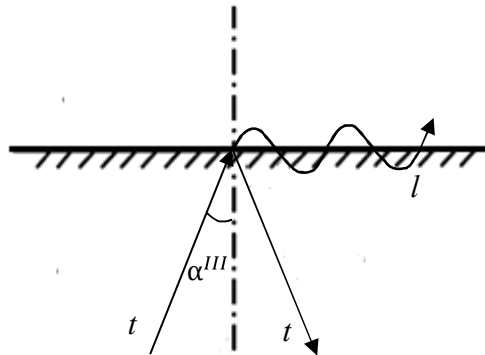


Рис. 4.4. Трансформация падающей поперечной волны в головную на границе раздела двух сред

Третий критический угол определяется из условия

$$\frac{\sin \alpha^{III}}{c_t} = \frac{1}{c_l}.$$

Третий критический угол для границы сталь — воздух $\alpha^{III} = 33,3^\circ$.

4.4. Прохождение волн через границу раздела сред

4.4.1. Прохождение акустической волны через границу жидкость — жидкость

Контролируемая неразрушающими методами среда почти всегда твердая, поэтому случай границы жидкость — жидкость в практике акустического контроля не встречается. Однако на его примере удобно рассматривать основные закономерности отражения и преломления акустических волн, т. к. в жидкостях отсутствуют сдвиги, а следовательно, и поперечные волны (рис. 4.5).

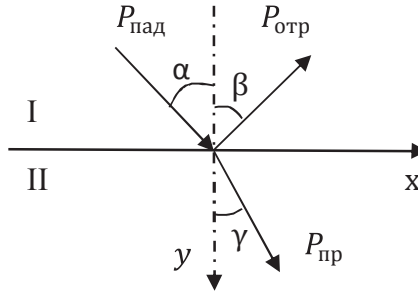


Рис. 4.5. Прохождение акустической волны через границу раздела жидкость — жидкость:

$P_{\text{пад}}$, $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{отр}}$ — амплитуды падающей, прошедшей и отраженной волн

Запишем выражение для падающей волны для плоского случая ($\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}$) в комплексном виде. Для упрощения пренебрегаем затуханием в среде и опускаем фазовый множитель

$$p_{\text{пад}} = p_0 \exp(ik\vec{r}) = p_0 \exp\left[ik(x \cos(90 - \alpha) + y \cos \alpha)\right],$$

где k — волновой вектор;

\vec{r} — радиус-вектор произвольной точки пространства.

Для отраженной волны

$$p_{\text{отр}} = p_0 R \exp\left[ik(x \sin \beta + y \cos \beta)\right],$$

где k — волновое число для первой среды.

Для прошедшей (преломленной) волны

$$p_{\text{прел}} = p_0 D \exp[ik'(x \sin \gamma + y \cos \gamma)],$$

где k' — волновое число для второй среды.

Рассмотрим граничные условия:

1) $y = 0$ — равенство давлений с двух сторон от границы раздела сред.

Тогда можно записать:

$$p_0 \exp(ikx \sin \alpha) + R p_0 \exp(ikx \sin \beta) = p_0 D \exp(ik' x \sin \gamma).$$

Учтем закон Снеллиуса: $k \sin \alpha = k \sin \beta = k' \sin \gamma$. В итоге получаем взаимосвязь между коэффициентами отражения и прохождения по амплитуде:

$$D = R + 1; \quad (4.3)$$

2) $x = 0$ — равенство нормальных составляющих колебательных скоростей с двух сторон от границы:

$$v_n = v_y = v \cos(yk),$$

$$v_n = \frac{P_{\text{пад}} \cos \alpha}{c \rho},$$

$$v_n = \frac{P_{\text{отр}} \cos \beta}{c \rho},$$

$$v_n' = \frac{P_{\text{прел}} \cos \gamma}{c' \rho'},$$

$$\frac{\cos \alpha}{c \rho} - \frac{R \cos \beta}{c \rho} = \frac{D \cos \gamma}{c' \rho'}. \quad (4.4)$$

При решении задач о поведении волн на границах сред используют понятие *нормального акустического импеданса*, который определяют как отношение акустического давления к нормальной составляющей колебательной скорости

$$Z_n = \frac{p}{v_n} = \frac{\rho c}{\cos \theta},$$

где ρc — волновое сопротивление среды;

θ — угол между осью y и направлением волны.

Нормальные акустические импедансы для падающей, отраженной и прошедшей волны равны соответственно:

$$Z_{\text{нпад}} = \frac{\rho c}{\cos \alpha}, \quad Z_{\text{нотр}} = \frac{\rho c}{\cos \beta}, \quad Z_{\text{нпрош}} = \frac{\rho' c'}{\cos \gamma}. \quad (4.5)$$

Подставив в выражение (4.4) выражения (4.5) для нормальных импедансов, получаем

$$\frac{1}{Z_{\text{нпад}}} - \frac{R}{Z_{\text{нотр}}} = \frac{D}{Z_{\text{нпрош}}}. \quad (4.6)$$

Из граничных условий следует равенство суммарных импедансов сверху и снизу от границы. *Суммарным импедансом* называют отношение суммы давлений к сумме нормальных составляющих колебательных скоростей для всех волн, существующих по одну сторону от границы,

$$\left. \frac{\sum p}{\sum v_n} \right|_{\text{сверху}} = \left. \frac{\sum p}{\sum v_n} \right|_{\text{снизу}},$$

или

$$\sum Z_n \Big|_{\text{сверху}} = \sum Z_n \Big|_{\text{снизу}}.$$

Далее можно показать с учетом выражений (4.3) и (4.6), что

$$R = \frac{\rho' c' / \cos \gamma - \rho c / \cos \alpha}{\rho' c' / \cos \gamma + \rho c / \cos \alpha} = \frac{Z'_n - Z_n}{Z'_n + Z_n},$$

где Z'_n — нормальный импеданс снизу от границы;

Z_n — нормальный импеданс сверху от границы.

В общем случае используют суммарные импедансы. Используя равенство давлений, можно доказать, что $1 + R = D$. Аналогично можно получить выражение для коэффициента прохождения по амплитуде

$$D = \frac{2Z'_n}{(Z'_n + Z_n)}.$$

Таким образом, коэффициенты отражения и прохождения зависят от того, из какой среды и в какую переходит волна, т. е. от направления распространения волны.

4.4.2. Энергетические соотношения на границе жидкость — жидкость и твердое тело — твердое тело

Рассмотрим соотношения энергий падающей и преломленной волн. Интенсивность для плоской бегущей гармонической волны

$$I = \frac{|p|^2}{2\rho c},$$

где p — акустическое давление;

ρ — плотность среды;

c — скорость волны.

Для определения доли прошедшей и отраженной энергии нужно выделить компоненту потока энергии, нормально падающего на границу. Нормальная компонента интенсивности падающей волны

$$I_n = I \cos \alpha,$$

где I — интенсивность падающей волны.

Нормальная компонента для преломленной волны

$$I'_n = I' \cos \gamma,$$

где I' — интенсивность прошедшей волны. Отсюда коэффициент прозрачности по энергии

$$\tilde{D} = \frac{I' \cos \gamma}{I \cos \alpha} = \frac{4Z'Z}{(Z + Z')^2}.$$

Сопоставление его с коэффициентом прозрачности по амплитуде показывает, что коэффициент прозрачности по энергии равен произведению значений D при прохождении через границу в прямом и обратном направлениях

$$\tilde{D} = D_{\uparrow} D_{\downarrow}.$$

Это положение справедливо для любых сред и особенно важно для дефектоскопии, поскольку, при введении волн в объект контроля через какую-либо промежуточную среду, энергия обычно проходит через границу в двух направлениях.

Коэффициент отражения по интенсивности

$$\tilde{R} = R^2 = \left(\frac{Z' - Z}{Z + Z'} \right)^2.$$

Энергетические соотношения для границы двух жидких сред

$$R^2 + \tilde{D} = 1.$$

Для границы двух твердых тел соотношение R и D может быть получено путем обобщения для границы жидкость — жидкость.

Для границы твердое тело — твердое тело коэффициент отражения по амплитуде

$$R = \frac{\sum Z - 2Z_{\text{пад}}}{\sum Z},$$

где $\sum Z$ — сумма импедансов всех отраженных и преломленных волн.

Это выражение может быть использовано для расчета отраженной волны, совпадающей по типу с падающей.

Коэффициент прохождения по энергии в этом случае

$$\tilde{D} = \frac{4Z_{\text{пад}} \cdot Z_{\text{прел}}}{(\sum Z)^2}. \quad (4.41)$$

Выражение для \tilde{D} может быть использовано для расчета волны, не совпадающей по типу с падающей. Кроме того, данная формула применима как для границы твердое тело — твердое тело, так и для границы жидкость — жидкость.

Нормальный акустический импеданс для продольной и поперечной волн соответственно

$$Z_l = \left(\frac{c_l \rho}{\cos \theta_l} \right) \cos^2(2\theta_l), \quad Z_t = \left(\frac{c_t \rho}{\cos \theta_t} \right) \sin^2(2\theta_t),$$

где θ_l и θ_t — углы между направлениями соответствующих волн и нормалью к поверхности.

4.5. Угловая зависимость коэффициентов прозрачности

На рис. 4.6 показаны коэффициенты прозрачности по энергии, рассчитанные для сред, часто встречающихся в дефектоскопии: оргстекло — масло — сталь. Коэффициенты прохождения продольных

$D_{||}$ и поперечных D_{\perp} волн зависят от угла падения α продольной волны. В области малых углов падения ($\alpha < 8^\circ$) коэффициент прохождения поперечных волн близок к нулю, т. е. в ОК наблюдается практически только продольная волна, а поперечная волна очень слаба. Эту область используют для возбуждения продольных волн с углом наклона к поверхности до 20° , например, в отдельно-совмещенных преобразователях. Далее, вплоть до первого критического угла, идет область существования одновременно двух типов волн. Наличие интенсивных продольной и поперечной волн в ОК затрудняет расшифровку результатов контроля, поэтому эти области углов падения используют в дефектоскопии редко.

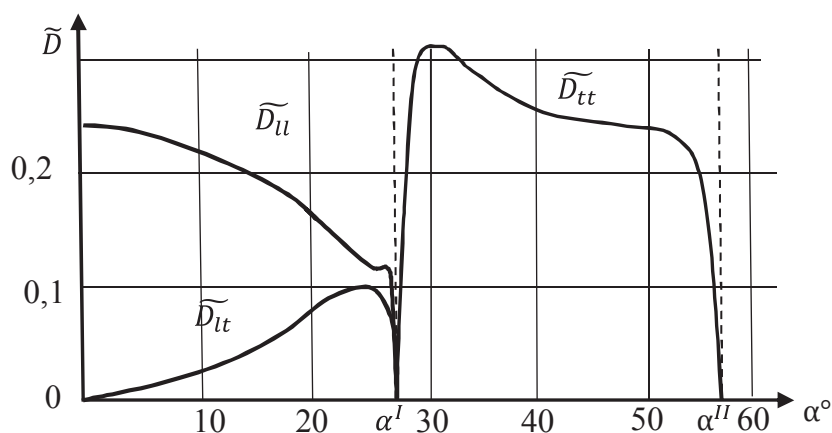


Рис. 4.6. Коэффициенты прозрачности для границы оргстекло — сталь, разделенной тонким слоем масла

При первом критическом угле наиболее интенсивно возбуждается головная волна, коэффициенты прохождения продольной и поперечной волны близки к нулю, т. е. в ОК не проходит ни одна волна. Вся энергия падающей продольной волны трансформируется в энергию головной волны, распространяющейся по поверхности границы раздела сред.

В интервале между первым и вторым критическими углами в ОК распространяется только поперечная волна. Этот интервал углов падения приблизительно $30\text{--}55^\circ$ (для границы оргстекло — сталь) используется в преобразователях поперечных волн.

При значении угла падения больше второго критического поперечная волна исчезает, возбуждается поверхностная волна Рэлея.

4.6. Отражение акустической волны от свободной поверхности твердого тела

В ультразвуковой дефектоскопии часто приходится встречаться с отражением волны, распространяющейся внутри твердого тела, от поверхностей. При отражении продольной и вертикально поляризованной поперечной волн может происходить трансформация типов волн. При падении волны из металла на границу раздела металл — газ выполняется условие $C' < C$, где C' — скорость распространения акустической волны в газе; C — скорость распространения акустической волны в металле.

На рис. 4.7 представлена схема отражения волн от границы раздела металл — газ.

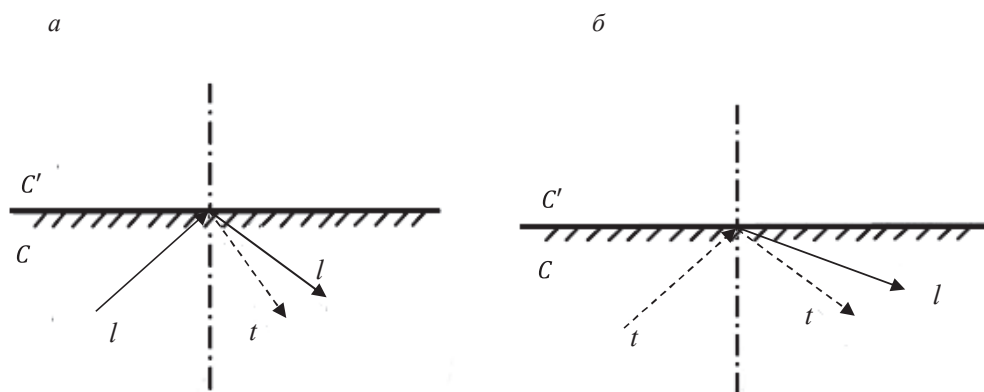


Рис. 4.7. Отражение акустических волн от границы сталь — воздух:

а — падение на границу раздела сред продольной волны; б — падение на границу раздела сред поперечной волны

Коэффициент отражения от границы зависит от угла падения акустических волн. Эта зависимость для границы сталь — воздух приведена на рис. 4.8, а для падающей продольной волны и на рис. 4.8, б для падающей поперечной волны.

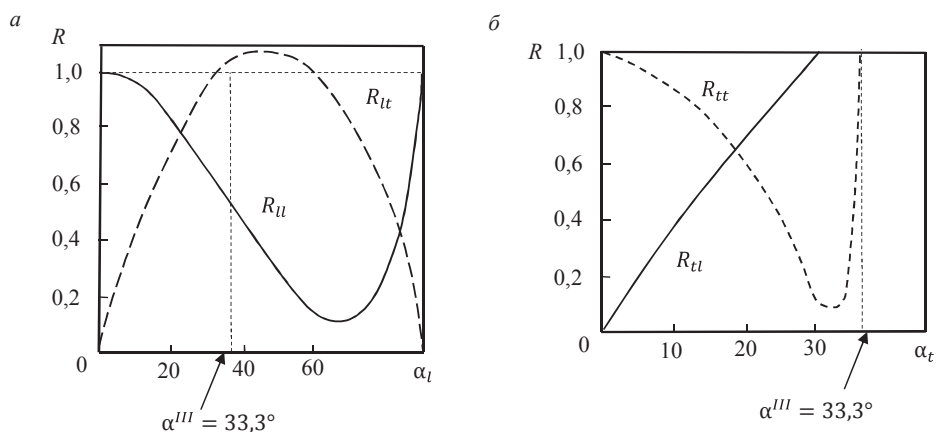


Рис. 4.8. Угловая зависимость коэффициента отражения для границы сталь — воздух в случае падения первичной продольной (а) и первичной поперечной (б) волны

Из приведенных графиков видно, что максимумы коэффициентов отражения по амплитуде смещения могут принимать значения больше единицы. Это явление характерно для трансформированных волн. Поскольку при трансформации происходит изменение плоскости колебаний частиц и скорости распространения волн, законы сохранения импульса и энергии не нарушаются.

Как известно, при падении поперечной волны существует третий критический угол α^{III} (для стали $\alpha^{III} = 33,5^\circ$). При значениях углов, превышающих значения третьего критического, коэффициент отражения для продольной волны $|R_{ll}|$ обращается в ноль, а для поперечной $|R_{tt}|$ по модулю равен единице. При этом изменяется его фаза, в результате чего возникает явление незеркального отражения. Смещение энергии вдоль поверхности необходимо учитывать при расчете амплитуды отражения от дефектов вблизи поверхности объекта контроля.

При углах падения $\alpha_i = 68^\circ$ для продольных и $\alpha_i = 31^\circ$ для поперечных волн (эти углы связаны между собой законом синусов) коэффициенты отражения нетрансформированной волны в стали минимальны. Это означает, что подавляющая часть энергии при данных углах падения переходит в трансформированную волну. Соответствующие углы α_i и α_t называются квазиобменными. Их следует отличать от обменных углов, при которых происходит полная трансформация типов волн.

4.7. Явление незеркального отражения

Отражение упругих волн следует закону Снеллиуса при условии, что на границу раздела падает плоская волна и шероховатость на границе отсутствует. В таком случае наблюдается зеркальное отражение: параллельный пучок лучей после отражения остается параллельным, и угол падения равен углу отражения, если не происходит трансформации волн. Если шероховатость поверхности высока, волна отражается диффузно (рис. 4.9).

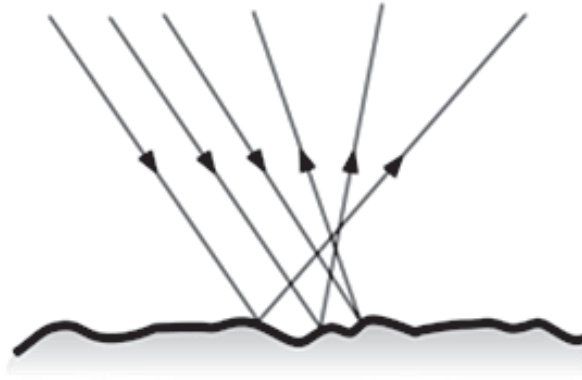


Рис. 4.9. Явление диффузного рассеяния при отражении волны от шероховатой поверхности

Незеркальное отражение также возникает в случае, когда угол падения первичной продольной волны немного больше первого критического угла α^I . В этом случае отраженный пучок лучей как бы смещается вдоль поверхности тела относительно падающего (рис. 4.10).

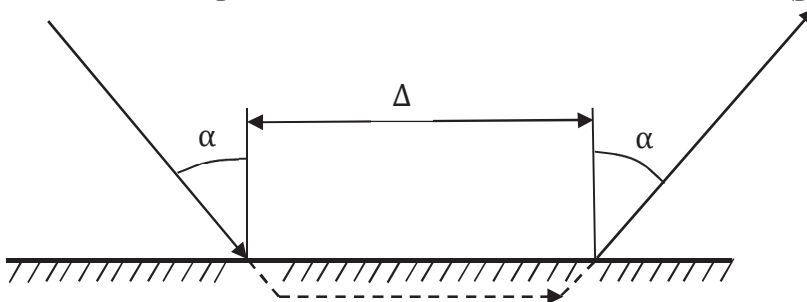


Рис. 4.10. Смещение пучка лучей при незеркальном отражении:

Δ — расстояние между точками входа и выхода луча

Рассмотрим случай незеркального отражения на границе жидкость – жидкость. При этом будем считать, что $c < c'$. Как известно, первый критический угол $\alpha' = \arcsin(c/c')$.

При $\alpha = \alpha'$, $\sin \gamma = 1$ и $\tilde{R} = 1$, т.е. энергия во вторую среду не проходит. Если же $\alpha > \alpha'$, то $\sin \gamma = c'/c \sin \alpha > 1$. Это возможно в том случае, когда угол γ принимает комплексные значения. В таком случае

$$\cos \gamma = \sqrt{1 - (c'/c \sin \alpha)^2} = iC,$$

где C — некоторая постоянная, зависящая от свойств обеих сред.

В выражении для преломленной волны в этом случае появится множитель e^{-kCx} . Он показывает, что эта волна, распространяясь вдоль оси y , затухает с увеличением расстояния x от поверхности, причем тем быстрее, чем угол α больше критического значения. Волну такого типа относят к типу неоднородных волн. Нормальный импеданс в этом случае становится мнимым

$$Z' = \frac{\rho' c'}{\cos \gamma} = \frac{\rho' c'}{i \sqrt{(c' \sin \alpha / c)^2 - 1}}.$$

Коэффициент отражения тоже является комплексной величиной $|R| = 1$, т.е. отраженная волна имеет амплитуду, равную амплитуде падающей, но меняет при отражении свою фазу. Изменение этой фазы на значение величины, не кратное π , при углах падения α больше критического α' приводит к явлению незеркального отражения. Смещение Δ отраженного пучка лучей вдоль поверхности тела относительно падающего пучка такое, как если бы отражение происходило зеркально от мнимой границы, расположенной на некоторой глубине h под действительной поверхностью (рис. 4.11),

$$\Delta = 2h \operatorname{tg} \alpha.$$

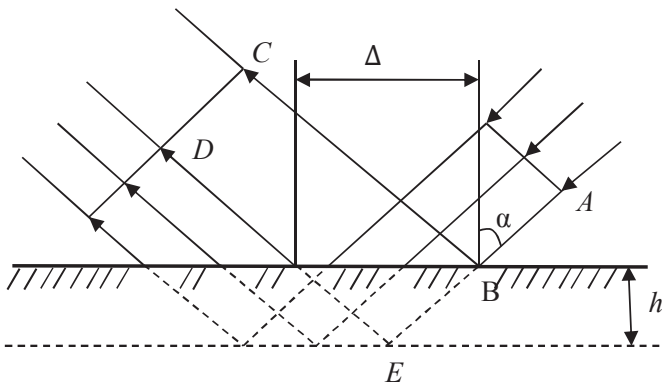


Рис. 4.11. Смещение пучка лучей при незеркальном отражении

Рассмотрим случай падения сферической волны от источника O на границу раздела двух сред (рис. 4.12). На большом расстоянии можно приближенно рассматривать каждый луч как плоскую волну и применять к нему полученные ранее закономерности отражения и преломления для плоской волны.



91

чение угла к критическому, тем больше соответствующее смещение $DD' > EE'$.

Поскольку угол отражения остается равным углу падения, незеркально отраженные лучи из точек E' и D' пересекутся в некоторой точке. Другие незеркально отраженные лучи соберутся в других точках. Точки пересечения образуют некоторую поверхность. Подобную поверхность, на которой пересекаются два или более луча, (она может вырождаться в линию или точку) называют каустикой. Для луча OC , угол падения которого равен критическому, смещение стремится к бесконечности.

4.8. Отражение от двугранного угла

Все рассмотренные выше эффекты следует иметь в виду при контроле изделий сложной конфигурации. Рассмотрим отражение от двугранного угла как наиболее простого и часто встречающегося изделия со сложной конфигурацией. Рассмотрим случай, когда не происходит трансформации волн. Тогда при падении плоской волны в результате двукратного отражения нетрансформированный эхосигнал возвращается к излучающему преобразователю, испытав параллельное смещение (рис. 4.13, *а*).

При падении на двугранный угол сферической волны от точечного источника O отражение происходит, как от мнимой плоскости MN . Отраженные лучи можно также представить как результат излучения мнимого источника O' (рис. 4.13, *б*).

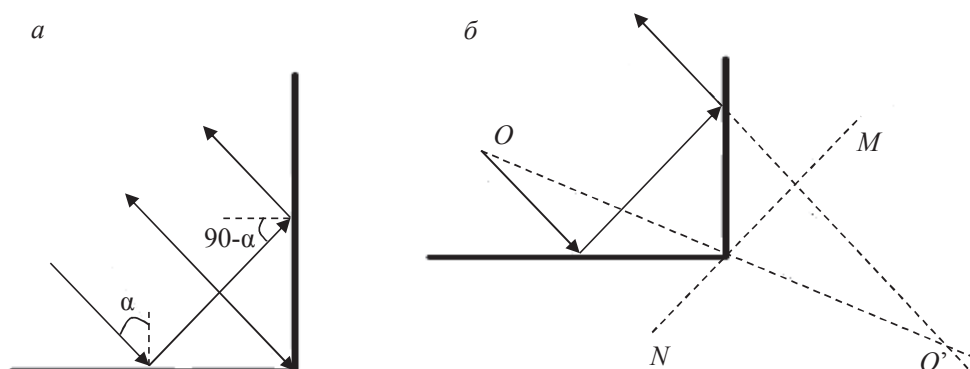


Рис. 4.13. Отражение от двугранного угла плоских (*а*) и сферических (*б*) нетрансформированных волн

С учетом трансформации амплитуда однотипной волны, отраженной от двугранного угла, может существенно уменьшаться. Особенно сильное ослабление однотипной волны наблюдается, когда угол падения на одной из граней близок к обменному (рис. 4.14).

Для поперечной волны, когда углы падения на обе грани больше третьего критического α^{III} , коэффициент отражения равен единице. При падении поперечной волны на границу сталь — воздух под углами $\alpha^{III} < \alpha < \alpha^{II}$ двугранный угол отражает так же, как плоскость. Это дает возможность использовать его для настройки чувствительности дефектоскопа при контроле наклонным преобразователем с углом ввода из этого диапазона.

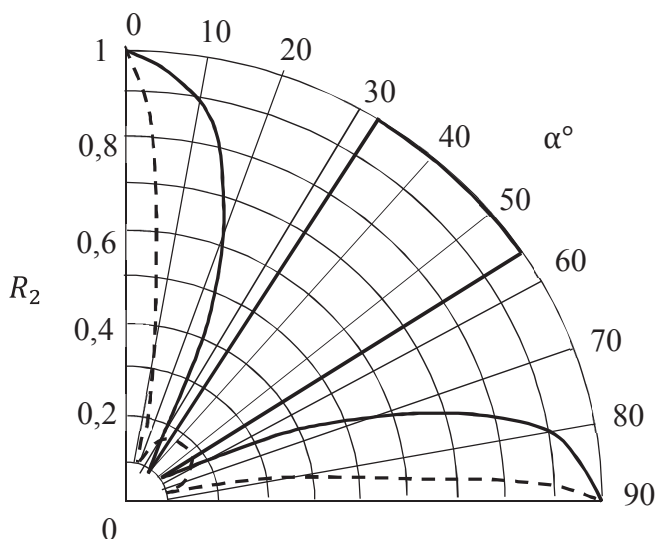


Рис. 4.14. Номограмма для определения амплитуды отраженной волны с учетом трансформации

4.9. Прохождение волн через тонкий слой на границе раздела двух сред

Рассмотрим общий случай наклонного падения продольной волны, считая для простоты все среды жидкими, т. к. в них не происходит трансформация типов волн (рис. 4.15).

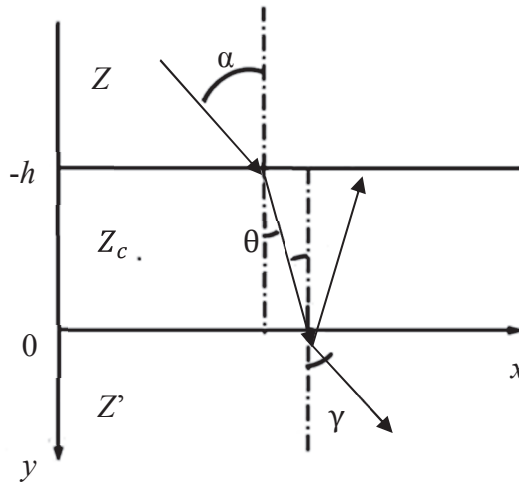


Рис. 4.15. Прохождение продольных волн через границу двух сред, разделенных тонким слоем

Для определения коэффициентов отражения R и прохождения D воспользуемся граничными условиями: давление и нормальные составляющие колебательных скоростей не меняются при переходе через границы слоя (здесь и далее слоем будем называть среду II).

Выражения для давления p и нормальной составляющей колебательной скорости v_n имеют вид

$$p = [A \exp(ik_c y \cos \theta) + B \exp(-ik_c y \cos \theta)] \exp(ik_c x \sin \theta); \quad (4.7)$$

$$v_{n=1/Z_c} [A \exp(ik_c y \cos \theta) + B \exp(-ik_c y \cos \theta)] \exp(ik_c x \sin \theta), \quad (4.8)$$

где k_c — волновое число в тонком слое;

Z_c — нормальный импеданс тонкого слоя, $Z_c = \rho_c C_l / \cos \theta$.

Зададим граничные условия.

1) На границе $y = 0$

$$\frac{p}{v_n} = Z_c \frac{A + B}{A - B} = Z', \quad (4.9)$$

где Z' — входной нормальный импеданс для нижней границы.

В данном случае $Z_c = \rho_c C_l / \cos \theta$;

2) на границе $y = -h$ воспользуемся условием равенства суммарных импедансов сверху и снизу от границы:

$$\sum Z_{\text{н}} \Big|_{\text{сверху}} = \sum Z_{\text{н}} \Big|_{\text{снизу}} .$$

Используя это условие, найдем значение входного импеданса для верхней границы:

$$Z_{\text{вх}} = p / v_{\text{н}} .$$

В таком случае с учетом формул (4.7) и (4.8)

$$Z_{\text{вх}} = Z_c \frac{Ae^{-k_c h \cos \theta} + Be^{k_c h \cos \theta}}{Ae^{-k_c h \cos \theta} - Be^{k_c h \cos \theta}} .$$

С учетом выражения (4.9) получим

$$Z_{\text{вх}} = Z_c \frac{Z' - iZ_c \operatorname{tg}(k_c h \cos \theta)}{Z_c - iZ' \operatorname{tg}(k_c h \cos \theta)} , \quad (4.10)$$

где Z_c — нормальный импеданс слоя;

Z' — нормальный импеданс нижней среды.

Таким образом, входной импеданс первой границы зависит от нормальных импедансов II и III сред. Наличие мнимой части у $Z_{\text{вх}}$ означает, что ρ и $v_{\text{н}}$ не совпадают по фазе. Из формулы (4.10) нетрудно получить частный случай нормального падения волны. Тогда все соответствующие углы равны нулю, а их косинусы — единице. Нормальный же импеданс можно заменить характеристическим, поскольку они равны между собой. Как известно, коэффициент отражения волны от границы двух сред определяется по формуле

$$R = \frac{Z' - Z}{Z' + Z} ,$$

где Z, Z' — нормальные импедансы сред.

По аналогии можем записать коэффициент отражения от верхней границы для сред, разделенных тонким слоем, заменив Z' на $Z_{\text{вх}}$:

$$R = \frac{Z_{\text{вх}} - Z}{Z_{\text{вх}} + Z} ,$$

где Z — нормальный импеданс среды (в случае нормального падения равен характеристическому).

Формулу (4.10) можно вывести прямым решением уравнений из условий на границе, не используя понятие входного импеданса, как это было сделано выше. Ценность рассмотренного подхода в том, что мож-

но распространить полученный результат на произвольное число слоев. В этом случае в уравнение (4.10) вместо Z' необходимо подставить входной импеданс для нижней границы слоя. Это применимо для всех последующих слоев. Если имеется два слоя, то Z' определяется по той же формуле, что и $Z_{\text{вх}}$.

На практике возможным является использование слоев различной толщины. Проанализируем наиболее значимые с точки зрения эффективности АК соотношения.

1. Толщина слоя h равна целому числу длин полуволн

$$h = n\lambda / 2, \text{ или } k_c h = n\pi.$$

Тогда справедливо

$$Z_{\text{вх}} = Z' = \rho' C'.$$

При этом коэффициент отражения определяется как

$$R = \frac{Z' - Z}{Z' + Z}.$$

Последнее равенство означает, что при нормальном падении волны слой с толщиной, равной или кратной половине волны, не влияет на отражение и прохождение, и коэффициенты отражения и прохождения зависят только от импедансов верхней и нижней сред.

В случае наклонного падения должно выполняться условие $h = n\lambda / 2$, при этом реализуется соотношение $k_c h \cos \theta = n\pi$, что совпадает с условием возникновения нормальных волн Лэмба.

2. Если толщина слоя равна нечетному числу четвертей длин волн, т.е. $h = (2n+1)\lambda / 4$, или $k_c h = (2n+1)\pi / 2$, то выражения для $Z_{\text{вх}}$ и R имеют вид

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_c^2}{Z'} \text{ и } R = \frac{Z_c^2 - ZZ'}{Z_c^2 + ZZ'}.$$

Таким образом, если толщина слоя кратна четверти длины волны, то слой влияет на отражение и прохождение волн через границу. В этом случае даже малое изменение толщины тонкого слоя может привести к существенному изменению коэффициентов отражения и прохождения.

4.10. Влияние толщины слоя на прохождение акустических волн

При разделении сред тонким слоем возможно получение неодинаковых значений коэффициентов отражения в зависимости от соотношения значений импедансов трех сред. Рассмотрим два случая.

Симметричный случай — $Z < Z_c > Z'$ или $Z > Z_c < Z'$.

Коэффициент отражения максимален $R = R_{\max}$ при выполнении условия $h = (2n + 1)\lambda / 4$.

Коэффициент отражения минимален $R = R_{\min}$ при выполнении условия $h = n\lambda / 2$.

Несимметричный случай — $Z < Z_c < Z'$ или $Z > Z_c > Z'$.

Коэффициент отражения максимален ($R = R_{\max}$) при выполнении условия $h = n\lambda / 2$. Коэффициент отражения минимален ($R = R_{\min}$) при выполнении условия $h = (2n + 1)\lambda / 4$.

Из приведенных соотношений видно, что четвертьволновый слой улучшает условия прохождения акустических волн через границу в несимметричном случае, а полуволновый — в симметричном. Таким образом, путем подбора материалов контактирующих промежуточных сред можно добиться эффекта просветления границ раздела, т.е. добиться выполнения условий $R = R_{\min}$ и $D = D_{\max}$. Особенно важно обеспечить реализацию этого эффекта при подборе материала и расчете толщины конструктивных элементов преобразователя.

Физической причиной осцилляции коэффициентов R и D при изменении толщины промежуточного слоя является интерференция волн в тонком слое. Для иллюстрации рассмотрим преобразователь как комбинацию слоев (рис. 4.16).

На рис. 4.16 среда I — пьезопластина (импеданс Z), среда II — протектор (импеданс Z_c), среда III — контактная жидкость (импеданс Z'). Для данной схемы реализуется несимметричный случай, т.е. $Z > Z_c > Z'$.

Пусть толщина протектора равна четверти длины волны $h = \lambda / 4$. Изменение фазы для прошедшей волны с учетом толщины слоя протектора

$$\Delta\varphi_{\text{пр}} = 2\pi h / \lambda = \pi / 2.$$

Изменение фазы однократно отраженной волны

$$\Delta\varphi_{\text{отр1}} = 2\pi 3h / \lambda_c = 3\pi / 2.$$

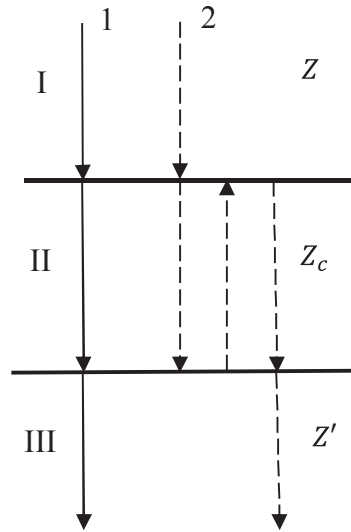


Рис. 4.16. Схема, поясняющая изменение фазы для сквозной волны (1) и волны (2), испытавшей двукратное отражение:

I, II, III — среды с различными акустическими свойствами

При отражении от нижней границы вследствие существенного различия импедансов сред произойдет изменение фазы на значение Λ . При отражении от верхней границы фаза останется прежней. При прохождении волны в среду III произойдет изменение фазы на $\pi / 2$. Общее изменение фазы для двукратно отраженной волны составляет

$$\Delta\varphi_{\text{отр}} = \frac{3\pi}{2} + \pi - \frac{\pi}{2} = 2\pi.$$

Таким образом, на нижней границе фазы прошедшей волны и волны, испытавшей двукратное отражение, совпадают. Вследствие этого происходит увеличение суммарной амплитуды волн, а значение коэффициента прозрачности для границы сред, разделенных тонким слоем, становится максимальным. В случае полуволнового слоя имеет место обратная ситуация: суммарная амплитуда на нижней границе уменьшается, а коэффициент прозрачности принимает минимальное значение.

Для очень тонкого слоя ($h \ll \lambda$) в симметричном случае ($Z > Z_c < Z'$) справедливо соотношение $\operatorname{tg}(k_c h) \approx k_c h$. Тогда коэффициент отражения по интенсивности может быть определен по формуле

$$\tilde{R} = \frac{1}{1 + (Z_c \lambda_c / \pi Z h)^2}.$$

Эту модель можно использовать для описания эффектов отражения от различных дефектов типа трещин. Рассмотрим некоторые из них:

- малая трещина, заполненная воздухом, ($h = 10^{-6}$ мм), тогда для частоты 2,5 МГц

$$R = \sqrt{\tilde{R}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (Z_c \lambda_c / \pi Z h)^2}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{Z_c \lambda_c}{\pi Z h} \right)^2 \approx 92 \% \text{ и } \tilde{R} \approx 86 \%;$$

- трещина толщиной $h = 10^{-4}$ мм, $\tilde{R} \approx 99,84\%$;
- граница сталь — воздух (модель бесконечно широкой трещины), $h \rightarrow \infty$, $\tilde{R} \approx 99,9963\%$.

Таким образом, видно, что коэффициент отражения будет близок к единице, если в зазоре между преобразователем и поверхностью объекта контроля отсутствует контактная жидкость. Если же этот зазор заполнен жидкостью, то в этом случае коэффициент отражения существенно уменьшается. Аналогичная ситуация имеет место также для заполненных дефектов и дефектов типа трещин с малым раскрытием, выявляемость которых гораздо ниже в сравнении с полыми дефектами того же размера.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение коэффициентов прохождения и отражения по амплитуде и интенсивности. Как они зависят от акустических импедансов контактирующих сред?
2. Сформулируйте закон Снеллиуса. Поясните смысл величин, входящих в соответствующее выражение.
3. Запишите энергетические соотношения для границы двух сред.
4. Что такое критические углы? Из каких условий они определяются?

5. Поясните сущность явления незеркального отражения. Каковы его причины?
6. Каковы особенности отражения упругих волн от двугранного угла? Почему этот случай важен для практики?
7. Какие закономерности определяют прохождение волн на границе двух сред, разделенных тонким слоем? Поясните влияние толщины слоя на прохождение акустических волн через границу.

5. ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА

В настоящее время ультразвуковую (УЗ) контрольно-измерительную аппаратуру применяют в самых различных областях науки и техники: в дефектоскопии, при медицинской диагностике, исследовании физических свойств материалов, контроле геометрических размеров объектов и т. д. Обработка полезных сигналов значительно облегчается, если импульсы акустических волн имеют заданную пространственно-временную характеристику. Поэтому важнейшие функциональные и метрологические возможности ультразвуковой аппаратуры неразрушающего контроля определяются, как правило, в соответствии с параметрами электромеханических преобразователей — излучателей и приемников УЗК. Ультразвуковые преобразователи — устройства, предназначенные для преобразования электрических колебаний в механические и обратно. В качестве первичных датчиков используют преобразователи различных типов. По принципу действия преобразователи делятся на группы:

- механические;
- электродинамические;
- электрострикционные;
- пьезоэлектрические;
- магнитодинамические;
- магнитострикционные;
- и др.

Наибольшее распространение в современных приборах УЗ-дефектоскопии получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП).

5.1. Пьезоэлектрический эффект

Под воздействием механического напряжения или деформации в кристалле может возникнуть электрическая поляризация, величина и знак которой зависят от направления и значения приложенного напряжения. Это явление, называемое пьезоэлектрическим эффектом, положено в основу пьезоэлектрических преобразователей.

В качестве материалов для пьезоэлементов используют ионные кристаллы, в структуре которых расположены разноименные ионы (катионы и анионы). При определенных типах симметрии кристаллической решетки ионных кристаллов их деформация приводит к пространственному перераспределению электрических зарядов. Иначе говоря, природа пьезоэлектрического эффекта связана с изменением положения ионов в кристаллической решетке вещества. Под влиянием деформации ионы перемещаются таким образом, что образуются электрические диполи и кристалл оказывается поляризованным (рис. 5.1).

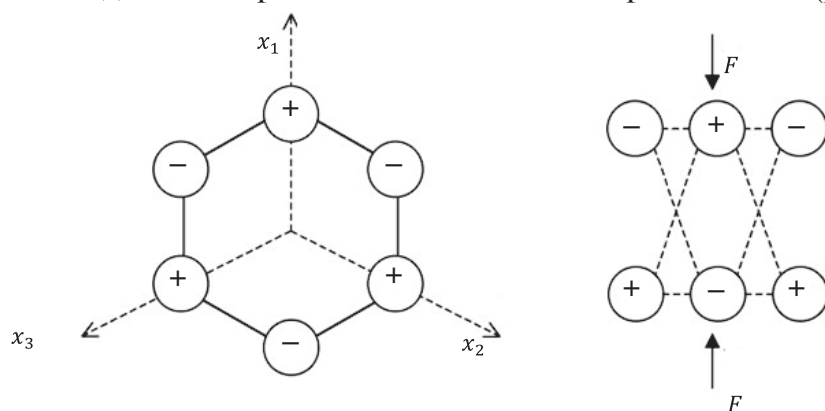


Рис. 5.1. Расположение ионов в кристалле:

a — деформация отсутствует, кристалл электрически нейтрален;
б — смещение зарядов в результате деформации

Если к поверхностям пьезоэлемента приложить переменное электрическое напряжение, то преобразователь из-за пьезоэффекта будет генерировать механические колебания (сжиматься и растягиваться) с частотой приложенного электрического напряжения. Таким образом, пьезоэлектрический преобразователь позволяет трансформиро-

вать электрические колебания в ультразвуковые (режим излучения), и наоборот, ультразвуковые в электрические (режим приема).

В преобразователях УЗ-дефектоскопов пьезоэлементы обычно имеют форму плоскопараллельных пластин. На рис. 5.2 показаны различные типы деформаций, которые может испытывать пластина. Для генерации или приема продольных колебаний используют деформацию растяжения-сжатия, для генерации или приема поперечных колебаний — сдвиговую деформацию.

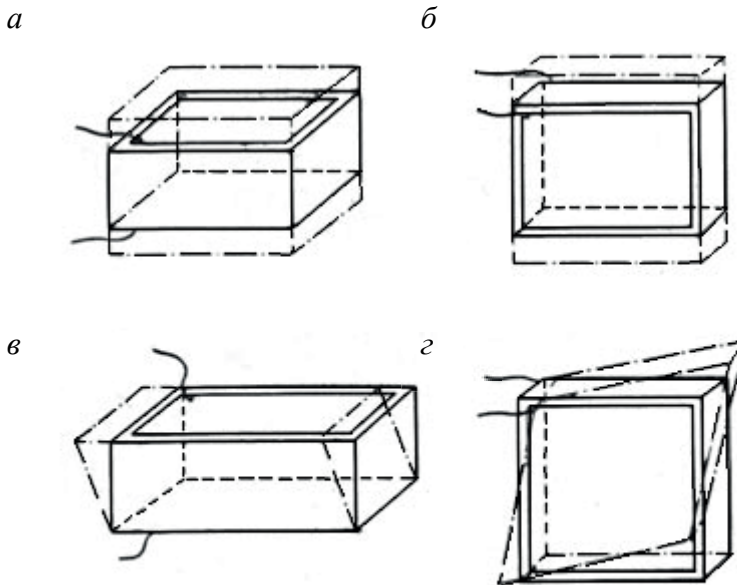


Рис. 5.2. Типы деформации пьезоэлектрических пластин:

а — растяжение-сжатие по толщине; *б* — растяжение-сжатие по ширине;
в — сдвиг по толщине; *г* — сдвиг по ширине

С математической точки зрения пьезоэффект можно определить как совокупность уравнений, линейно связывающих механические и электрические величины. Коэффициенты пропорциональности между этими величинами называют *пьезоэлектрическими коэффициентами (пьезомодулями)*, которые в общем случае представляют собой тензоры третьего ранга. Это обусловлено тем, что, вследствие низкой симметрии кристаллической структуры, любой пьезоматериал является анизотропным веществом.

Уравнения прямого пьезоэффекта:

$$P_n = d_{nik} T_{ik} = e_{nik} \varepsilon_{ik}; \quad (5.1)$$

$$E_m = -h_{mik} \varepsilon_{ik} = -g_{mik} T_{ik}. \quad (5.2)$$

Уравнения обратного пьезоэффекта:

$$\varepsilon_{ik} = d_{mik} E_m = g_{nik} P_n; \quad (5.3)$$

$$T_{ik} = -e_{mik} E_m = -h_{nik} P_n, \quad (5.4)$$

где P_n — вектор поляризации; T_{ik} — тензор механического напряжения; ε_{ik} — тензор относительной деформации; E_m — вектор напряженности электрического поля; d_{mik} , e_{mik} , h_{nik} , g_{nik} — пьезомодули.

Благодаря симметрии по индексам i, k пьезомодули имеют 18 независимых компонентов. Уравнения (5.1)–(5.4) показывают, в каком состоянии находится образец, обладающий пьезосвойствами:

- 1) механически зажатый образец — деформация постоянна и равна нулю;
- 2) механически свободный образец — напряжения равны нулю;
- 3) электрически свободное (закороченное) состояние — вся поверхность находится под одним и тем же потенциалом;
- 4) электрически зажатое (разомкнутое) состояние соответствует полной электрической изоляции образца, т.е. отсутствию на его поверхности свободных зарядов.

На практике чаще реализуются коэффициенты d_{mik} и g_{nik} . Коэффициент d_{mik} характеризует электрическую поляризацию. Материалы с большим значением d_{mik} используют в режимах приема и излучения, если необходима сильная деформация. Материалы с большим значением пьезокоэффициента g_{nik} используют в режимах приема и излучения для создания большого напряжения. Следует особо подчеркнуть, что пьезомодули прямого и обратного пьезоэффекта не равны между собой. Симметричность тензора пьезомодулей позволяет в практических расчетах использовать матричную форму записи уравнений. При этом вводят систему обозначений

$$d_{111} = d_{11}, \quad d_{122} = d_{22}, \quad d_{133} = d_{33}$$

и учитывают равенства

$$d_{11} = -d_{12}, \quad d_{25} = -d_{14}, \quad d_{26} = -d_{11}.$$

Матрица пьезомодулей d для кристаллов α -кварца имеет вид

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Строки матрицы характеризуют поляризацию вдоль кристаллографических осей X , Y и Z (строки 1, 2 и 3 соответственно). Из приведенной выше матрицы следует, что вдоль направления Z кварц пьезоэлектрически нейтрален. Модуль d_{11} характеризует деформацию пьезопластин типа растяжение-сжатие, d_{14} — сдвиговую деформацию.

Наибольший практический интерес представляет собой обратный пьезоэффект, возбуждаемый в пьезоэлектрике приложенным к нему переменным напряжением. В этом случае кварцевая пластина будет совершать вынужденные механические колебания в такт изменения внешнего поля. Амплитуда этих колебаний достигает максимума, когда частота электрического поля окажется равной частоте собственных колебаний пластины.

Благодаря обратному пьезоэффекту возможно возникновение колебаний по длине и толщине пластины. Если пренебречь колебаниями по длине, то собственная частота основных продольных колебаний в приближении отсутствия поперечного сжатия будет

$$f = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}},$$

где C_{11} — соответствующий данному типу и ориентации колебаний модуль упругости; ρ — плотность кристалла.

Пьезокристалл представляет собой электромеханический преобразователь. При подаче напряжения в нем запасается определенное количество электрической энергии, часть которой, в силу пьезоэлектрических свойств кристалла, переходит в механическую энергию упругих деформаций. Соотношение этих энергий есть мера эффективности электромеханического преобразователя и называется коэффициентом электромеханической связи k .

При колебаниях по толщине механическая энергия на единицу объема кристалла определяется как

$$E_{\text{мех}} = \frac{1}{2} C_{11} d_{11}^2 E_x^2;$$

электрическая энергия на единицу объема

$$E_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon E_x^2}{8\pi}.$$

Квадрат коэффициента электромеханической связи k^2 определяется как отношение генерируемой в кристалле механической энергии к запасаемой в нем электрической, следовательно,

$$k = d_{11} \sqrt{\frac{4\pi C_{11}}{\varepsilon}}.$$

Указанный коэффициент связывает пьезоэлектрический модуль с упругими и диэлектрическими параметрами кристалла, т.е. наилучшим образом характеризует кристалл как электромеханический преобразователь.

Наряду с пьезопреобразователями, для целей УЗ-контроля используются другие физические явления, например, *электрострикция*. Главная особенность эффекта электрострикции состоит в нелинейной взаимосвязи между электрическими и механическими величинами. Упрощенно уравнение электрострикции можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon = kE^2,$$

где k — коэффициент электрострикции (обычно это тензор четвертого ранга, имеет 81 независимую компоненту).

5.2. Пьезоэлектрические материалы и их свойства

Для изготовления пьезоэлектрических преобразователей используются неполярные и полярные пьезоматериалы.

Неполярные пьезоэлектрики характеризуются малыми значениями диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрических модулей. Для них компоненты e_{ij} составляют порядка 1–20, $d_{ik} = (2 \dots 5) \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

Материалы этой группы имеют малые диэлектрические и механические потери, наблюдается слабая зависимость пьезосвойств от температуры.

По электрическим свойствам неполярные пьезоэлектрики делят на пьезодиэлектрики и пьезополупроводники. Из пьезодиэлектриков этой группы наиболее известен α -кварц. Типичными представителями группы пьезополупроводников являются сульфид и селенид кадмия, окись цинка.

Полярные пьезоэлектрики отличаются от других пьезоматериалов наличием собственной электрической поляризации, существующей при отсутствии внешней механической деформации и внешнего электрического поля. Они, в свою очередь, подразделяются на линейные (пироэлектрики) и нелинейные (сегнетоэлектрики). Наиболее существенные отличия сегнетоэлектриков от пироэлектриков состоят в том, что они имеют доменную структуру, характеризуются высокими значениями спонтанной поляризации, диэлектрической проницаемости и пьезомодулей, тогда как свойства пироэлектриков мало отличаются от свойств неполярных пьезоэлектриков. Основные представители пироэлектриков — турмалин, сульфат лития, оксид бериллия.

Наибольшее распространение в современных УЗ-преобразователях нашли сегнетоэлектрические материалы, из которых изготавливаются керамические пластины различных размеров и форм. Практическую ценность представляет керамика на основе твердых растворов титаната бария-калия (ТБК-3) и цирконата-титаната свинца (ЦТС-19). Для придания пьезосвойств керамика подвергается электрической поляризации, для чего ее медленно нагревают во внешнем электрическом поле высокой напряженности до температуры выше точки Кюри, а затем медленно охлаждают. Основные характеристики некоторых пьезоматериалов даны в табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Основные характеристики наиболее часто используемых пьезоматериалов

Характеристики	Класс				
	Кристаллы			Керамика	
Материал	α -Кварц	Турмалин	Сульфат лития	ЦТС-19	ТБК-3
Срез	X	Y	Z	Перпенд. плоскости пластины	
$C_l \cdot 10^3$, м/с	5,74	7,15	5,46	3,3	4,7
$\rho C_l 10^6$, кг/(м ² ·с)	15,2	22,2	11,2	23,0	25,0
$P_{\max} \cdot 10^{-5}$, Н/м	950,0	—	150,0	600,0	750,0
ϵ	4,5	7,5	10,3	1685,0	1200,0
e , Кл/м ²	0,175	0,32	0,9	14,4	12,0
β	0,094	0,098	0,380	0,4	0,2
T_{\max} , °C	570,0	—	75,0	290,0	100,0

Примечание. Обозначения, принятые в таблице: C_l — скорость звука; ρC_l — характеристический импеданс; P_{\max} — максимальное механическое напряжение; ϵ — диэлектрическая проницаемость; e — пьезоконстанта; β — коэффициент электромеханической связи; T_{\max} — максимальная рабочая температура.

Таблица 5.2

Сравнительная характеристика монокристаллов и керамики

Свойства	Монокристаллы	Керамика
Пьезомодуль, d	Невысокий	Высокий
Обл. рабочих температур, T_{\max} , °C	500–600	200–250
Добротность, Q	Высокая	Низкая
Температурная стабильность свойств	Высокая	Старение (располяризация)
Экономичность	Низкая	Высокая

5.3. Классификация пьезопреобразователей

Преобразователи для приборов неразрушающего контроля классифицируют по ряду признаков.

По способу ввода УЗ-колебаний различают преобразователи:

- контактные, которые прижимаются к поверхности изделия, предварительно смазанной жидкостью (маслом, глицерином и др.); в некоторых случаях слой жидкости заменяют эластичным материалом (эластичным протектором);
- иммерсионные, между поверхностью которых и изделием имеется толстый слой жидкости (толщина этого слоя во много раз превышает длину волны); при этом изделие целиком или частично погружают в иммерсионную ванну;
- щелевые (менисковые), между поверхностью которых и изделием создается зазор порядка длины волны ультразвука; жидкость в зазоре удерживается силами поверхностного натяжения;
- преобразователи с сухим точечным контактом, имеющие шарообразную поверхность, плотно соприкасающуюся с изделием, площадь соприкосновения 0,01–0,5 мм²;
- бесконтактные, возбуждающие акустические колебания в изделии через слой воздуха (воздушно-акустическая связь).

Использование контактных преобразователей с эластичным протектором, а также щелевых, контактно-иммерсионных и бесконтактных

преобразователей позволяет снизить требования к чистоте поверхности контролируемого изделия.

По способу конструктивного исполнения различают преобразователи:

- совмещенные, которые соединяются одновременно с генератором и усилителем прибора и служат как для излучения, так и для приема ультразвука;
- раздельные, состоящие из излучателя, соединенного с генератором прибора, и приемника, соединенного с усилителем;
- раздельно-совмещенные (РС), состоящие из излучателя и приемника, конструктивно связанных между собой, но разделенных электрическим и акустическим экранами.

По направлению УЗ-волны различают преобразователи:

- прямые;
- наклонные;
- комбинированные.

По форме рабочей поверхности или пьезоэлемента преобразователи бывают:

- плоские с пьезопластиной плоской формы;
- фокусирующие, обеспечивающие сужение акустического поля в некоторой области контролируемого объекта;
- неплоские.

Раздельно-совмещенные преобразователи в зависимости от направления их общей акустической оси, соответствующей направлению максимальной чувствительности таких преобразователей, называют также нормальными, или наклонными. Преобразователи с переменным углом наклона позволяют в определенных пределах изменять угол ввода луча.

5.4. Конструкция преобразователей

Прямой преобразователь. Прямой совмещенный преобразователь предназначен для генерации и приема продольных волн в импульсном режиме. Наибольшее распространение совмещенные преобразователи получили в качестве датчика эхоимпульсных ультразвуковых дефектоскопов. Типовая схема такого преобразователя представлена на рис. 5.3.

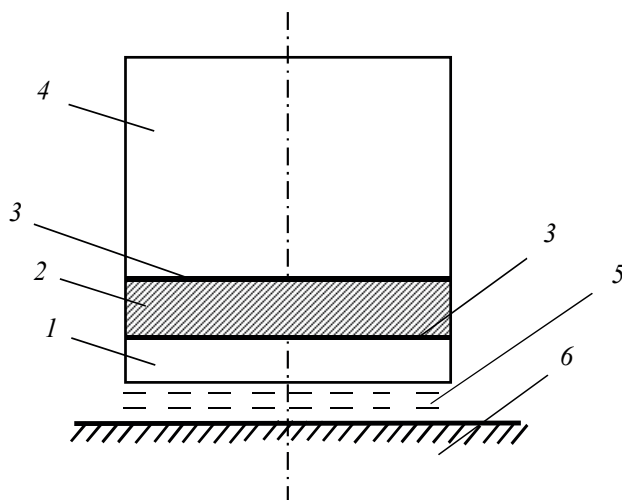


Рис. 5.3. Схема совмещенного пьезопреобразователя:

1 — протектор; 2 — пьезоэлемент; 3 — электрод; 4 — демпфер; 5 — контактная жидкость; 6 — объект контроля

Пьезоэлемент изготавливают, учитывая условие резонанса $h = \lambda/2$. Размеры в поперечных направлениях выбирают такими, чтобы интервалы времени пробега продольных УЗ-волн по толщине и длине пьезоэлемента значительно различались. Поперечные размеры пьезоэлемента должны быть во много раз больше его толщины.

Важную роль в обеспечении нормальной работы пьезоэлемента играют металлические электроды, которые наносятся не на всю поверхность, чтобы избежать пробоя по краям. В качестве материала электродов в основном используют серебро и никель. При прочих равных условиях соотношение между размерами площадей поверхности пьезопластины, покрытых электродами и свободных от них, оказывает существенное влияние на добротность пьезоэлемента и характеристики акустического поля. Регулируя размер электродов, можно в довольно широких пределах менять характеристики акустического поля в изделии.

Протектор предназначен для защиты пьезоэлемента от механических повреждений, от коррозии и для обеспечения акустического контакта. Толщина протектора обычно выбирается четвертьволновой для обеспечения качественного акустического контакта. Для протекторов выбирают материалы, характеризующиеся высокой износостойкостью, малым затуханием УЗК и высокой скоростью звука.

Демпфер защищает пьезоэлемент от механических повреждений и гасит паразитные колебания. Демпфер изготавливают из материала с большим поглощением ультразвука, чтобы отраженная от верхней грани волна не возвращалась к пьезоэлементу и не вызывала помех. Рекомендуются, чтобы демпфер обеспечивал затухание паразитных сигналов не менее 60–80 дБ.

Между пьезоэлементом и ОК обычно располагается несколько тонких промежуточных слоев. Сюда, в частности, входит электрод 3, подводящий электрическое напряжение к пьезопластине, протектор 1, защищающий пьезопластину от механических повреждений, и прослойка контактной жидкости между протектором и изделием (см. рис. 5.3).

Добротность является важной характеристикой преобразователей любого типа, т. к. она характеризует резонансные свойства колебательной системы. Добротность определяется как

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f},$$

где f_0 — резонансная частота системы; Δf — полоса частот на заданном уровне (например, на уровне 0,7 или 0,5 от амплитуды на резонансной частоте).

Полоса частот определяет фронтальную разрешающую способность. Лучевая разрешающая способность зависит от длительности УЗ-импульса. Общая добротность системы определяется по величинам акустической $Q_{\text{ак}}$ и электрической $Q_{\text{эл}}$ добротности и связана с ними соотношением

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{ак}}} + \frac{1}{Q_{\text{эл}}}.$$

Управлять акустической добротностью можно только на стадии изготовления за счет изменения конструктивных особенностей преобразователя. На электрическую добротность влияют параметры электрической цепи, поэтому ее можно изменять путем настройки электроакустического тракта прибора. Добротность связана с АЧХ, точнее, с полосой пропускания Δf (рис. 5.4). Чем выше добротность, тем более узкой будет полоса пропускания частот.

Повышение добротности увеличивает амплитуду колебаний пьезоэлемента и, следовательно, повышает чувствительность прибора. Одна-

ко увеличение длительности колебаний пьезопластины весьма нежелательно при импульсном режиме работы, т. к. это мешает отдельной регистрации двух быстро следующих друг за другом импульсов. При большой добротности колебания пьезопластины долго не затухают, а фронт импульсов размывается, что существенно ухудшает лучевую разрешающую способность дефектоскопа.

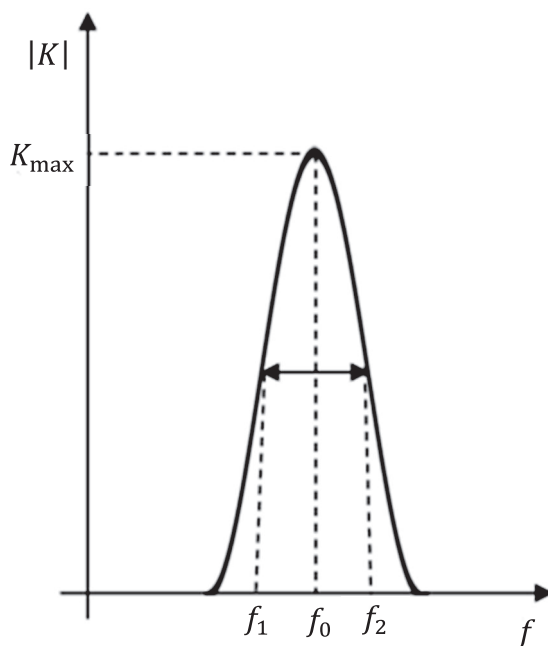


Рис. 5.4. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя

Наклонные преобразователи. Наклонный преобразователь (рис. 5.5) используется для приема и излучения поперечных волн.

Выбор рабочего пьезоэлемента для наклонных преобразователей зависит от решаемых дефектоскопических задач, т. к., наряду с обычными требованиями, здесь необходимо учесть наличие обязательной акустической линии задержки (более подробно об этом будет рассказано ниже), а также широкое применение преобразователей наклонного типа для выявления труднодоступных и удаленных дефектов. С учетом этого при выборе материала пьезопластины для наклонного преобразователя предпочтение отдают материалам с малым характеристическим импедансом и низкой диэлектрической проницаемостью.

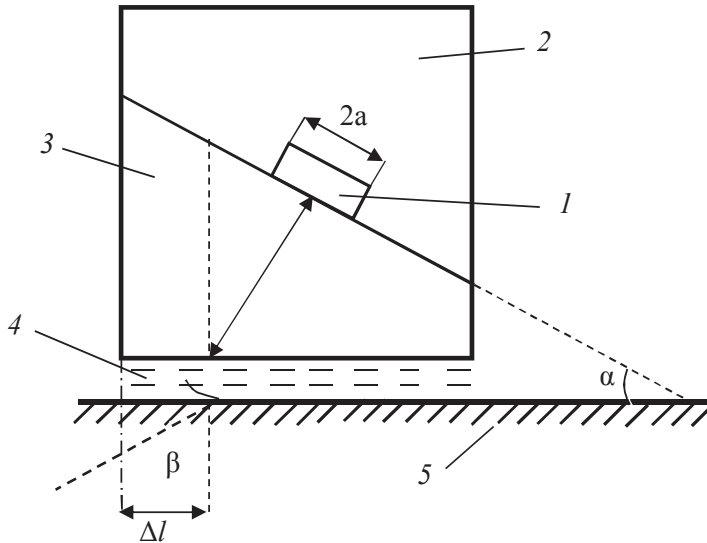


Рис. 5.5. Схема устройства наклонного преобразователя:

1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — призма; 4 — контактная жидкость;
5 — объект контроля; α — угол призмы; β — угол ввода; $2a$ — диаметр пьезопластины

Призма обеспечивает ввод упругих колебаний в объект контроля под необходимым углом. Призма должна обеспечить при малых углах падения (углах призмы) достаточно большие углы β — углы преломления акустической оси, что достигается за счет разности скорости ультразвука в материале призмы и в материале изделия. В качестве материала призмы обычно выбирают органическое стекло (плексиглас). Геометрические размеры призм в зависимости от назначения преобразователя могут изменяться в широких пределах. При этом также изменяются углы ввода луча в объект контроля. В наклонных преобразователях, осуществляющих контроль на сдвиговых волнах, углы призмы (углы падения) имеют значения в интервале между первым и вторым критическими углами.

Важной характеристикой и геометрическим параметром призмы является *стрела преобразователя* Δl — расстояние от точки ввода УЗ-пучка в изделие до передней грани призмы (см. рис. 5.5). Стрела характеризует минимальное расстояние, на котором можно расположить преобразователь вблизи выступов на поверхности изделия (например, валик усиления сварного шва). Это расстояние выбирают таким об-

разом, чтобы УЗ-колебания, зеркально отражающиеся от передней грани призмы и поверхности изделия, не попадали непосредственно на пьезоэлемент.

Другая характеристика наклонного преобразователя — точка выхода луча. Знание точного положения этой точки необходимо для определения условных размеров обнаруженного дефекта.

Угол ввода — угол, при котором регистрируется максимальное отражение от модельного дефекта в виде горизонтального сверления в стандартном образце СО-2. Как правило, при больших углах призмы, угол ввода может существенно отличаться от угла преломления акустической оси.

Раздельно-совмещенный преобразователь (рис. 5.6). В рассмотренных выше преобразователях возникновение шумов обусловлено реверберационными явлениями в самом пьезоэлементе и в элементах конструкции пьезопреобразователей. Наиболее очевидный способ устранения этих шумов — применение раздельных пьезоэлементов для излучения и приема упругих сигналов. Такие преобразователи получили название *раздельно-совмещенных* (РС). Для удобства работы приемный и излучающий пьезоэлементы объединены в общий корпус. В РС-преобразователях длительность излучаемых упругих сигналов и реверберационные шумы мало влияют на выявление близко расположенных дефектов.

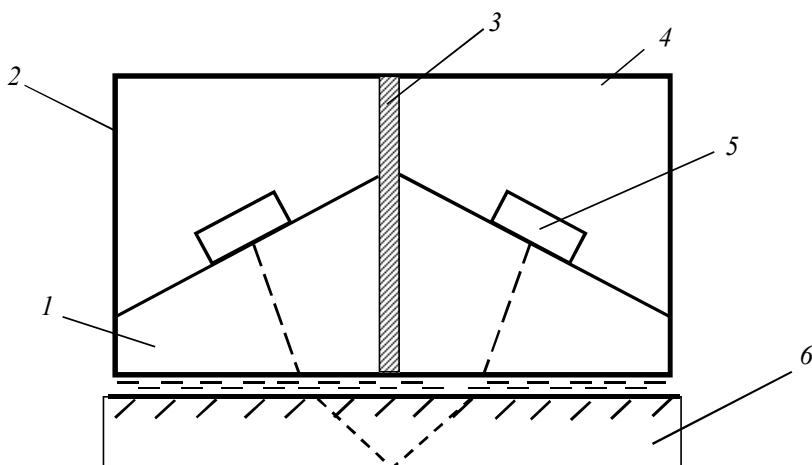


Рис. 5.6. Схема устройства раздельно-совмещенного преобразователя:

1 — призма; 2 — корпус; 3 — электроакустический экран; 4 — демпфер;
5 — пьезопластина; 6 — объект контроля

РС-преобразователи наиболее широко применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить малую мертвую зону, например, при контроле толщины изделий с малыми размерами в направлении прозвучивания. Наиболее массовыми изделиями такого типа, кроме листового проката, являются прутки и трубы. РС-преобразователи применяются также при контроле изделий из крупнозернистых материалов и при контроле с применением головных волн.

К специальным пьезопреобразователям относят различные фокусирующие системы и так называемые фазированные решетки. Фокусирующие системы применяют для повышения разрешающей способности, чувствительности (особенно на фоне структурных помех), точности определения координат и размеров дефекта. Существует четыре основных типа фокусирующих систем.

Активные концентраторы — изогнутые пьезоэлементы, представляющие собой часть сферы или цилиндра, (рис. 5.7). Фокусное расстояние F таких концентраторов равно радиусу их кривизны R ; по радиусу a зрчка и фокусному расстоянию определяют угол раскрытия фронта

$$\theta_m = \arcsin \frac{a}{F}.$$

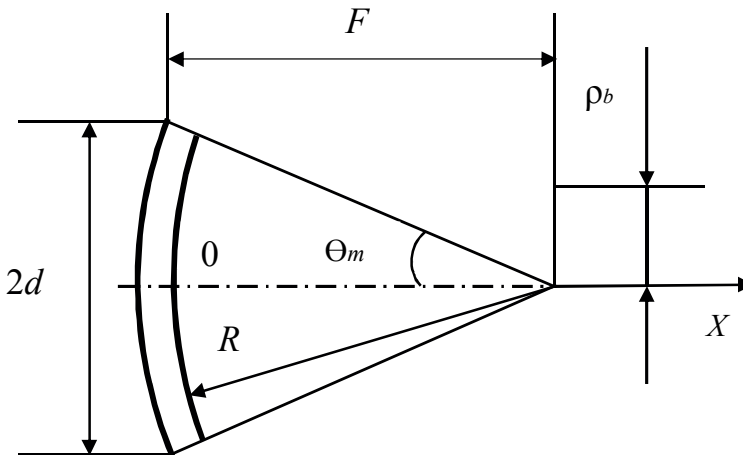


Рис. 5.7. Активный концентратор

Рефракторы — линзы, преобразующие плоскую волну в сходящуюся, (рис. 5.8). Линзы делают вогнутыми (ускоряющими) или выпуклыми (замедляющими) в зависимости от соотношения скоростей звука

в среде c_{cp} и материале линзы $c_{л}$, т.е. от показателя преломления $n = \frac{c_{cp}}{c_{л}}$.

Для фокусировки ультразвука при $n < 1$ линза должна быть вогнутой, при $n > 1$ — выпуклой. Если среда — иммерсионная жидкость, а линза сделана из органического стекла, то $n < 1$. Фокусное расстояние такой плосковогнутой линзы связано с ее радиусом кривизны соотношением

$$F = \frac{R}{1 - n}.$$

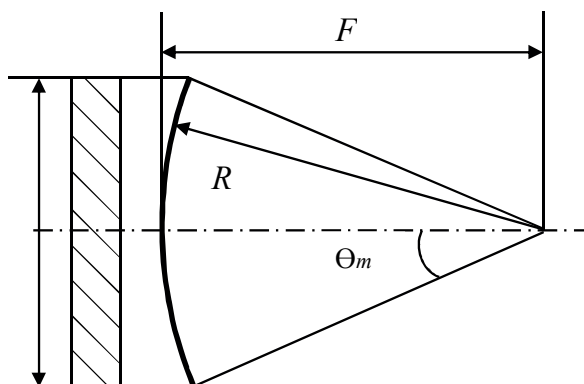


Рис. 5.8. Рефрактор

Рефлекторы — отражатели, преобразующие плоскую волну в сходящуюся. В дефектоскопии применяют рефлекторы в виде криволинейных зеркал в призме, в которых формирование сходящегося фронта осуществляется одновременно с поворотом пучка (рис. 5.9).

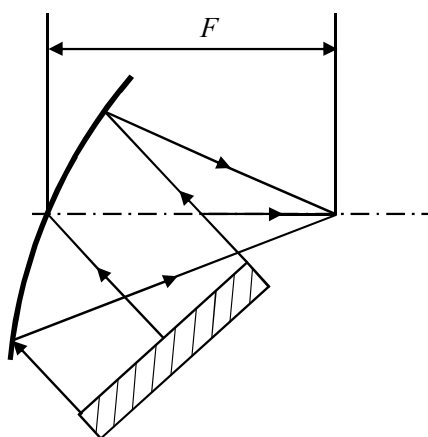


Рис. 5.9. Рефлектор

Дефлекторы — зональные пластинки, состоящие из чередующихся акустически прозрачных и непрозрачных колец, внутренний $a_{\text{в}}$ и наружный $a_{\text{н}}$ радиусы которых определяются в соответствии с соотношениями

$$a_{\text{в}} = \sqrt{2mF\lambda}; a_{\text{н}} = \sqrt{(2m+1)F\lambda},$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

Существенного выигрыша в амплитуде сигнала при фазовой фокусировке можно достичь, разделив пластину на кольца, соответствующие зонам Френеля, (например, глубокими бороздками) и подав на электроды четных и нечетных колец электрические сигналы в противофазе. Такое включение колец показано на рис. 5.10.

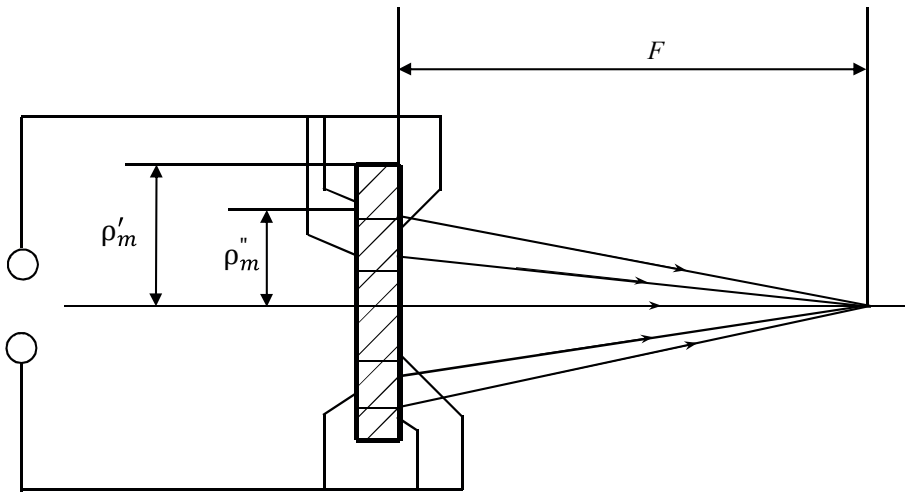


Рис. 5.10. Дефлектор

Мозаичные преобразователи (фазированные решетки) в известной степени являются аналогией радиолокационных фазированных антенных решеток. Фазированные решетки (рис. 5.11) позволяют оптимизировать структуру акустического поля и увеличить чувствительность преобразователя.

В фазированных решетках пьезоэлементы подключаются последовательно со сдвигом по фазе $\Delta\varphi$, за счет этого происходит задержка по времени Δt

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi}{2\pi f}.$$

Следовательно, можно управлять углом ввода УЗ в объект контроля

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\lambda \Delta t}{d} f\right),$$

где d — период решетки.

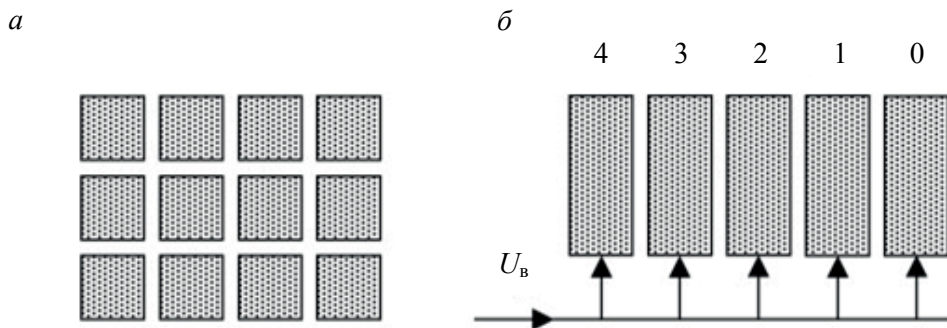


Рис. 5.11. Фазированные решетки:

а — схема расположения пьезопластин в мозаичном преобразователе;
б — схема подачи напряжения на фазированную решетку

5.5. Обозначение пьезопреобразователей

В соответствии с ГОСТ 23702–79 принята буквенно-цифровая система обозначения преобразователей.

Буква П означает «Преобразователь». Далее следует группа цифр:

1) способ контакта (1 — контактный; 2 — иммерсионный; 3 — контактно-иммерсионный);

2) направление оптической оси (1 — для прямых преобразователей; 2 — для наклонных);

3) режим работы (1 — совмещенный; 2 — отдельный; 3 — раздельно-совмещенный);

4) ставится буква Ф для фокусирующих преобразователей, Н — для неплоских. Для плоских буква не ставится;

5) после дефиса следует группа цифр, указывающая частоту преобразователя в мегагерцах;

б) для наклонных преобразователей после дефиса указывается угол призмы из органического стекла в градусах (если призма изготовлена из другого материала, то производится пересчет на органическое стекло).

Пример обозначения: П111–0,5. Расшифровка: контактный прямой совмещенный плоский преобразователь, работающий на частоте 0,5 МГц.

Пример обозначения: П121–1,25–30°. Расшифровка: контактный наклонный совмещенный плоский преобразователь, работающий на частоте 1,25 МГц, угол призмы 30°.

5.6. Передаточная функция преобразователя

Пьезопластина является основным чувствительным элементом ПЭП. Она электрически соединена с генератором и приемником прибора, а механически — с другими элементами преобразователя: демпфером, протектором, призмой. В связи с этим возникает необходимость характеризовать свойства ПЭП как целого узла с точки зрения эффективности излучения и приема акустических волн. Такими характеристиками служат комплексные передаточные функции, определяющие связь электрических и акустических сигналов.

Передаточной функцией называют зависимость комплексного отношения сигнала на выходе преобразователя к сигналу на его входе от частоты при определенной электрической и (или) акустической нагрузке. Различают передаточные функции режимов излучения, приема и двойного преобразования. В общем случае комплексную передаточную функцию можно записать в виде

$$K(j\omega) = |K(j\omega)|e^{-j\varphi(j\omega)}.$$

Модуль передаточной функции $K_0 = |K(j\omega)|$ называется коэффициентом преобразования.

Передаточную функцию при излучении $K_{\text{и}}$ определяют как отношение давления (механического напряжения, колебательной скорости) излученной волны к электрическому напряжению (току) возбуждающего генератора, а передаточную функцию при приеме $K_{\text{п}}$ — как отношение электрического напряжения на приемнике к давлению (механическому напряжению) падающей акустической волны. Указанные функции зависят от частоты сигнала. Вместо давления иногда используют смещение, а вместо электрического напряжения — ток.

Для совмещенных ПЭП или пары отдельных преобразователей (излучателя и приемника), которые используют для контроля методами отражения и прохождения, вводят передаточную функцию двойного преобразования $K = K_{\text{и}} K_{\text{п}}$.

Для решения большинства практических задач используют частные характеристики, следующие из передаточной функции, такие как коэффициент преобразования, рабочую частоту, полосу пропускания.

Коэффициент преобразования K_0 — максимальное значение модуля передаточной функции.

Рабочая частота f_0 — частота, соответствующая максимуму передаточной функции.

Полоса пропускания — частотный диапазон, в котором передаточная функция уменьшается не более чем на 6 дБ от максимума.

Определим коэффициент преобразования в режиме излучения, приема и двойного преобразования.

В режиме излучения входными параметрами являются электрическое напряжение либо ток; выходным — нормальное давление (либо механическое напряжение, колебательная скорость). Эти величины можно рассматривать в точке рабочей поверхности преобразователя или на каком-то принятом расстоянии от нее. Введем обозначения: U — электрическое напряжение на генераторе; I — ток возбуждающего генератора; P — нормальное давление на поверхности преобразователя.

На практике в режиме излучения наиболее часто используются следующие коэффициенты преобразования:

$$K_{PU} = \frac{P}{U}, \quad K_{PI} = \frac{P}{I}.$$

В режиме приема входными параметрами являются механическое напряжение, давление, смещение или колебательная скорость, а выходными — электрическое напряжение, сила тока. Для характеристики режима приема используют обозначения: U' — электрическое напряжение на генераторе; I' — ток возбуждающего генератора; P' — нормальное давление на поверхности преобразователя.

В этом случае обычно используют следующие коэффициенты преобразования:

$$K_{UP} = \frac{U'}{P'}, \quad K_{IP} = \frac{I'}{P'}.$$

Для режима двойного преобразования (излучения-приема) входными сигналами являются U и I , а выходными — U' и I' . В общем случае режим двойного преобразования характеризуют четыре коэффициента преобразования:

$$K_{UU} = \frac{U}{U'}, K_{UI} = \frac{U}{I'}, K_{II} = \frac{I}{I'}, K_{IU} = \frac{I}{U'}.$$

Коэффициент двойного преобразования можно определить через коэффициенты преобразования в режимах излучения и приема

$$K = K_{PU} K_{UP} = \frac{PU'}{UP'}.$$

Коэффициент двойного преобразования зависит от большого числа факторов: характеристик материала пьезопластины, параметров внешней электрической цепи, геометрии преобразователя и др. Изменяя эти факторы, можно регулировать значение коэффициента двойного преобразования и, следовательно, управлять чувствительностью. При этом следует учитывать, что в общем случае акустический импульс, проходя через среду, испытывает как ослабление, так и затухание, что влияет на величину коэффициента преобразования.

Задача о расчете электроакустического тракта УЗ-дефектоскопа заключается в определении коэффициента двойного преобразования. Эта задача решается с учетом эффектов ослабления и затухания ультразвука в контролируемом изделии.

5.7. Эквивалентные схемы пьезоизлучателей и приемников

В теории электроакустических преобразователей при разработке методов расчета и измерении их параметров важным моментом является установление взаимосвязи между передаточными функциями преобразователя и его сопротивлением.

Эквивалентные схемы применяются для расчета электроакустического тракта дефектоскопа: элементов электрической цепи и акустической нагрузки. В этих схемах пьезопластина представляется в виде некоторой пассивной нагрузки. Этот прием позволяет получить в общем виде выражение для акустической волны, излучаемой в изделие.

Обычно используют формулы для ПЭП, состоящего из пьезопластины, расположенной на протяженных средах без переходных слоев (рис. 5.12). Одна из сред — демпфер, другая — изделие, иммерси-

онная жидкость или призма преобразователя. Обычно между ПЭП и средой имеются промежуточные слои: протектор или контактная жидкость. Параметры промежуточных слоев также входят в расчетные формулы для ПЭП. Для согласования с генератором и усилителем дефектоскопа необходимо знать комплексное электрическое сопротивление ПЭП.

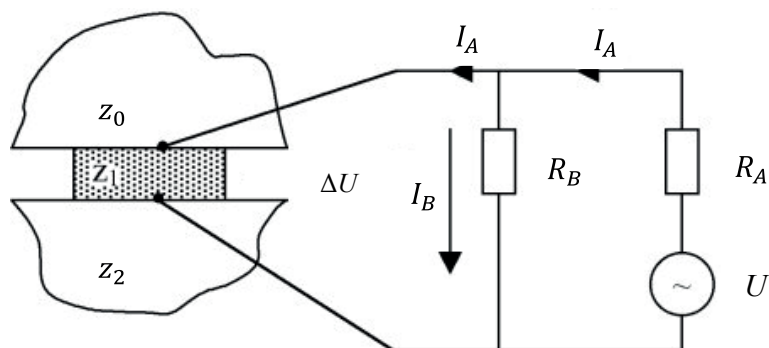


Рис. 5.12. Схема для расчета работы ПЭП:

Z_0 — демпфер; Z_1 — пьезопластина; Z_2 — объект контроля (или протектор);

ΔU — разность потенциалов между электродами пьезопластины

На рис. 5.12 представлена часто встречающаяся схема включения ПЭП. Генератор гармонических колебаний с напряжением U связан с пьезопластиной с помощью цепи, в которую входят электрические сопротивления R_A и R_B . Значения R_A и R_B подбирают из условий оптимальной связи генератора с ПЭП, т.е. достижения максимальных значений коэффициента преобразования и широкополосности. Широкополосность имеет особое значение для импульсных дефектоскопов: позволяет обеспечить наименьшее искажение в процессе излучения и приема коротких акустических импульсов.

Пластину принимают бесконечной вдоль нагружаемой поверхности, не учитывая колебания в поперечном направлении. Такое допущение справедливо для пластины с большими поперечными размерами и малой толщиной. С двух сторон пластина нагружена на среды с комплексными акустическими импедансами z_0 и z_2 .

На рис. 5.13, а ПЭП представлен в виде эквивалентного комплексного электрического сопротивления

$$\frac{1}{R_{\Pi}} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_p} = \frac{I_{\Pi}}{\Delta U}.$$

Эквивалентное сопротивление состоит из параллельно включенных емкостного сопротивления пьезопластины R_C и пьезосопротивления R_p . Возможна также последовательная схема включения этих двух сопротивлений. Варьированием сопротивления R_B можно добиться изменения частоты генератора. При определенных условиях может возникнуть резонанс, что соответствует максимуму действительного сопротивления контура.

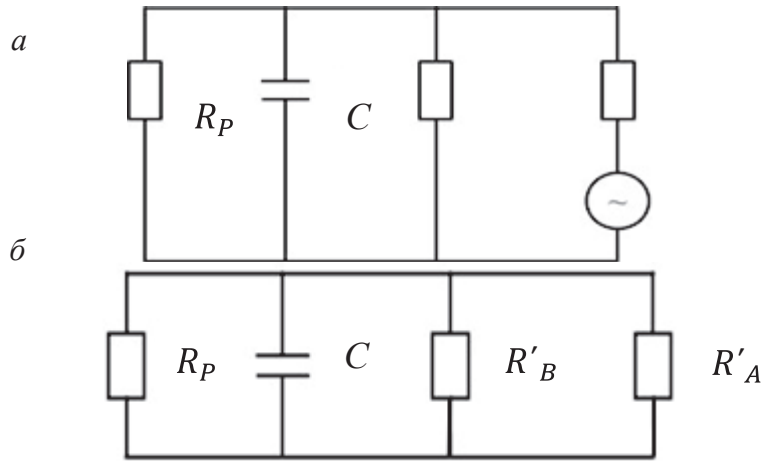


Рис. 5.13. Эквивалентная электрическая схема ПЭП в режимах излучения (а) и приема (б)

Расчет параметров пьезопластины в режиме приема (рис. 5.13, б) также входит в задачу об электроакустическом тракте. Ее решают на основе *теоремы взаимности*: акустическому давлению p ставят в соответствие электрическую разность потенциалов (напряжение) U , а колебательной скорости — электрический ток I .

Следует отметить, что схемы, изображенные на рис. 5.13, вообще говоря, не могут адекватно описывать ПЭП в широкой частотной полосе (исключение составляют, пожалуй, лишь пьезопленки), т. к. модуль импеданса таких схем является убывающей монотонной функцией частоты, в то время как для реального ПЭП модуль входного импеданса имеет выраженный максимум в окрестности резонансной частоты.

5.8. Рациональный выбор параметров преобразователя

Выбор параметров преобразователя происходит на всех этапах расчета и является одним из важнейших этапов проектирования. На этих стадиях решаются следующие задачи:

- 1) обеспечения максимальной чувствительности;
- 2) обеспечения максимальной ширины полосы частот;
- 3) обеспечения максимальной стабильности акустического контакта;
- 4) снижения шумов преобразователя (максимальное увеличение соотношения сигнал — шум);
- 5) обеспечения согласования импеданса преобразователя с генератором и усилителем;
- 6) оптимизации акустического поля преобразователя;
- 7) обеспечения повышенной износостойкости поверхности пьезопластины (при помощи протекторов).

Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Обеспечение максимальной чувствительности. Для получения сигналов большой амплитуды требуется повышение чувствительности. Чувствительность преобразователя описывается передаточной функцией. При излучении она позволяет найти акустический сигнал по известному электрическому, а в режиме приема — наоборот. Далее будет использоваться функция двойного преобразования, описывающая отношение принятого и посланного электрических сигналов.

Передаточная функция, как было отмечено выше, зависит от частоты. Коэффициент двойного преобразования достигает максимума на рабочей (оптимальной) частоте. При этом модуль функции двойного преобразования зависит от Q_A и $Q_{эл}$ — соответственно от акустической и электрической добротности. Эти величины являются характеристиками резонансных свойств колебательной системы

$$Q_{эл} = (\omega_0 R_0 C)^{-1},$$

где ω_0 — циклическая частота;

R_0 — приведенное сопротивление,

$$R_0 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B};$$

C — емкость.

В режиме приема генератор в эквивалентной схеме отсутствует (зашунтирован). Модуль функции двойного преобразования достигает максимума при выполнении следующего условия:

$$Q_{\text{эл}} = \frac{\pi^2}{8\beta^2 Q_{\text{ак}}},$$

где β^2 — коэффициент электромеханической связи.

В этом случае максимальное значение коэффициента преобразования определяется по формуле

$$K_{\text{max}} = \frac{R_0 z_2}{2R_A(z_1 + z_0)},$$

где z_2 — импеданс акустической нагрузки;

z_1 — импеданс пьезопластины;

z_0 — характеристический импеданс демпфера.

Таким образом, задача обеспечения максимальной чувствительности решается путем подбора импедансов контактной жидкости (призмы) и демпфера, а также изменения входного и шунтирующего сопротивления пьезоприемника.

Обеспечение максимальной ширины полосы частот. Полоса пропускания частот преобразователя оказывает влияние на достоверность результатов контроля. Очень короткие импульсы имеют наиболее широкий спектр частот, поэтому для приема таких импульсов без искажения необходимо иметь достаточно широкую полосу пропускания. При этом следует помнить, что расширенная полоса частот характерна для колебательных систем с низкой добротностью, а это ухудшает другие характеристики эхометода, например, чувствительность. Расширить полосу пропускания без снижения чувствительности можно посредством рационального выбора электрической и акустической добротности пьезопреобразователя. Широкополосность преобразователя позволяет добиться приема и излучения акустических импульсов без искажения их формы, а также улучшить параметры режима приема.

В теории колебаний полосу пропускания частот $\Delta f = f_1 - f_2$ определяют на основе амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)

$$K(f_1) = K(f_2) = \frac{K_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

На практике полосу пропускания Δf обычно оценивают на уровне -6 дБ от максимального значения коэффициента двойного преобразования K_{\max} , который соответствует резонансной частоте.

На рис. 5.14 представлено семейство АЧХ преобразователя с кварцевой пьезопластиной при различных значениях электрической добротности $Q_э$.

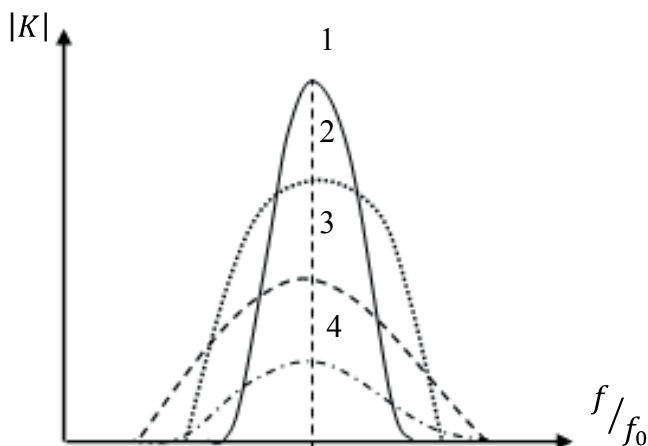


Рис. 5.14. Семейство АЧХ преобразователей из кварца с различной добротностью $Q_э$:

АЧХ 1 $Q_э = 10$; АЧХ 2 $Q_э = 1$; АЧХ 3 $Q_э = 10^{-1}$; АЧХ 4 $Q_э = 10^{-2}$

Видно, что с увеличением добротности $Q_э$ улучшается помехозащищенность, однако полоса пропускания частот сужается, что может приводить к искажению формы принимаемых коротких акустических импульсов. Таким образом, несмотря на то что кварц характеризуется высокой акустической добротностью, он имеет низкие значения пьезокоэффициентов. Вследствие этого при использовании кварцевых преобразователей реализуется *слабая электромеханическая связь*.

Керамические пластины характеризуются высокими значениями пьезокоэффициентов, поэтому имеет место *сильная электромеханическая связь* (рис. 5.15). В этом случае с увеличением значения $Q_э$ на АЧХ появляется локальный минимум на частоте $\frac{f}{f_0}$ и сужается полоса частот.

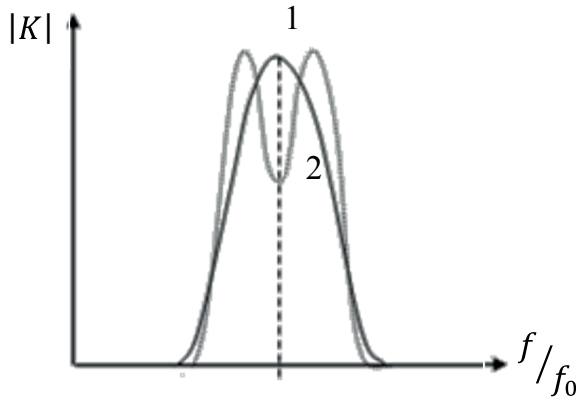


Рис. 5.15. Влияние пьезопластины из ЦТС (без протектора)
на широкополосность:
АЧХ 1 $Q_3 = 1$; АЧХ 2 $Q_3 = 10$

Таким образом, за счет снижения чувствительности можно расширить полосу частот (у кварца до 40 %). Увеличить значение K с одновременным расширением полосы частот для кварцевых преобразователей возможно посредством дополнительного введения протектора. Для пьезокерамики это сделать сложнее из-за сильной электромеханической связи.

Условие обеспечения стабильности акустического контакта является наиболее важным для контроля контактным и щелевым способом при помощи прямого преобразователя. В связи с этим важно добиться малого изменения величины коэффициента прозрачности D при разной толщине контактного слоя.

Для выполнения последнего условия используют протектор, который создает эффект просветления, обеспечивая близость коэффициента прохождения границы к единице. Характеристический импеданс протектора должен удовлетворять соотношению

$$z_{\text{пр}} = \sqrt{z_{\text{пп}} z_{\text{кж}}},$$

где $z_{\text{пр}}$ — импеданс протектора;

$z_{\text{пп}}$ — импеданс пьезопластины;

$z_{\text{кж}}$ — импеданс контактной жидкости.

Стабильность акустического контакта для преобразователей с акустической задержкой (призма или толстый слой иммерсионной жидкости) зависит только от условий перехода акустической волны из одной среды в другую без учета пьезоэффекта, т. е., наряду с просветлением границы, стабилизируется акустический контакт.

Еще одним важным условием для контроля преобразователем является *снижение шумов*. При контроле по совмещенной схеме контактным способом, после зондирующего импульса наблюдают многократные отражения ультразвуковых импульсов в пьезоэлементе, протекторе, демпфере, призме. Это помехи преобразователя. По мере удаления во времени от зондирующего импульса эти помехи уменьшаются и исчезают. При контроле преобразователем с акустической задержкой (иммерсионной жидкостью, призмой), помехи, непосредственно следующие после зондирующего импульса, не мешают контролю, т. к. в это время ультразвуковой импульс распространяется не в ОК. Однако в таком случае выявлению дефектов вблизи поверхности мешает интенсивный импульс, отраженный от этой поверхности, и сопровождающие его многократные отражения в элементах преобразователя.

Соотношение сигнал — шум определяется реверберационно-шумовой характеристикой (рис. 5.16). Она представляет собой зависимость амплитуды шумов от времени после окончания зондирующего импульса.

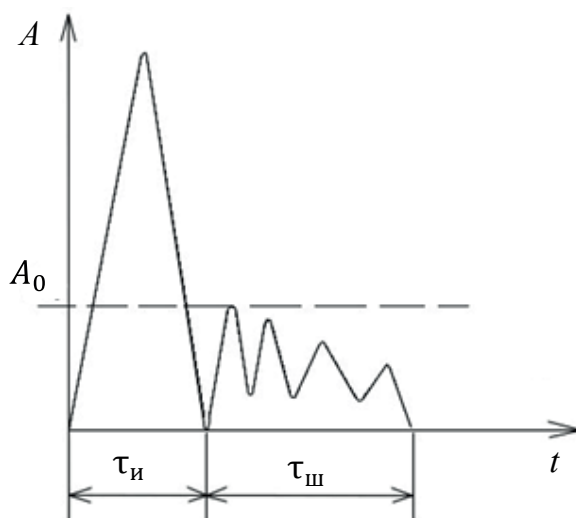


Рис. 5.16. Реверберационно-шумовая характеристика

Реверберационно-шумовая характеристика определяет величину *мертвой зоны* преобразователя, т. е. толщину приповерхностного слоя изделия, в котором дефекты не выявляются эхометодом:

$$h = \frac{(\tau_{\text{и}} + \tau_{\text{ш}})C}{2} \cos \alpha ,$$

где h — величина мертвой зоны;

$\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса;

$\tau_{\text{ш}}$ — длительность ревербераций;

C — скорость УЗ;

α — угол ввода.

Поскольку главным источником шумов являются многократные отражения в структурных элементах электроакустического преобразователя, постольку для улучшения характеристик ПЭП необходимо обеспечить максимальное снижение шумов в протекторе и демпфере. Для этой цели используют демпфер специальной формы с акустическими ловушками — тупиковыми направлениями распространения волн, изготовленный из материала с высоким коэффициентом затухания (эпоксидные смолы с дисперсным металлическим наполнителем). Другой способ снижения шумов — повышение добротности пьезопластины.

Одно из важных требований, предъявляемых к пьезопреобразователю, — согласование его полного электрического сопротивления с генератором по максимуму электрического напряжения на пьезопластине. Полное электрическое сопротивление пьезопластины — электрический импеданс — является комплексной величиной. По формуле эквивалентных проводимостей полная электрическая проводимость пьезопластины, представленной в виде двух нагрузок (активная и реактивная), определяется как

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p} = -i\omega C - \frac{g\omega CF}{1 + igF} ,$$

где ω — частота;

C — емкость;

g — пьезокоэффициент;

F — функция, характеризующая параметры электрической цепи.

Оптимизация акустического поля преобразователя — одно из требований при выборе метода акустического контроля и конкретных схем прозвучивания контролируемых изделий.

Оптимизировать параметры акустического поля можно варьируя размеры, геометрическую форму и рабочие характеристики пьезопреобразователя (частоту, диаграмму направленности). Один и тот же преобразователь будет иметь различную структуру поля в разных средах. Характеристикой акустического поля преобразователя является диаграмма направленности. Более подробно данный вопрос будет рассмотрен в параграфе 6.3 настоящего пособия.

Повышение износостойкости. Повышение износостойкости наиболее актуально для преобразователей контактного типа. Как уже было отмечено, в преобразователях наклонного типа используется призма из оргстекла. Если для осуществления контроля не требуется притирания рабочей поверхности призмы преобразователя к объекту (например, трубы различного диаметра), то в конструкции преобразователя используется протектор, который обеспечивает устойчивость к истиранию. Материал протектора и призмы обычно выбирается в зависимости от назначения пьезопреобразователя.

5.9. Бесконтактные способы излучения и приема акустических волн

Бесконтактные методы — это методы, при реализации которых отсутствует соприкосновение преобразователя с поверхностью объекта контроля через слой контактной жидкости. Необходимость использования бесконтактных методов излучения и приема ультразвука вызвана тем, что применение жидкой контактной среды ограничивает возможности контроля. Контактный метод невозможен в случае автоматического контроля при больших скоростях перемещения контролируемых объектов. Ограничения возможностей применения контактных методов также возникают при контроле объектов с шероховатой или загрязненной поверхностью, а также нагретых до высокой температуры. В подобных случаях можно использовать иммерсионный метод, однако чувствительность метода при использовании иммерсионной жидкости уменьшается в десятки раз. Уменьшение чувствительности происходит из-за двойного прохождения через границу раздела жидкость — твердое тело, кроме того, при этом необходима специальная аппаратура и обеспечение определенных условий проведения контроля. В то же время иммерсионный метод ограниченно применим в автоматических установках акустического контроля, т. к. при этом возникают сложно-

сти, связанные с созданием жидкой иммерсионной среды вокруг объекта контроля в условиях поточного производства.

Достоинства бесконтактных методов позволяют:

- обеспечить большие скорости контроля;
- обеспечить большие объемы контроля;
- реализовать контроль объектов с высокими температурами;
- контролировать шероховатые и загрязненные поверхности.

Воздушно-акустическая связь. Воздушно-акустическая связь реализуется при передаче ультразвуковых сигналов через слой воздуха. Схема контроля подобным методом приведена на рис. 5.17. Затухание ультразвуковых колебаний в воздухе велико, а коэффициент затухания пропорционален квадрату частоты $\delta \sim f^2$. Поэтому в таких случаях для уменьшения затухания применяют колебания низких частот $f = 0,1 \dots 0,5$ МГц.

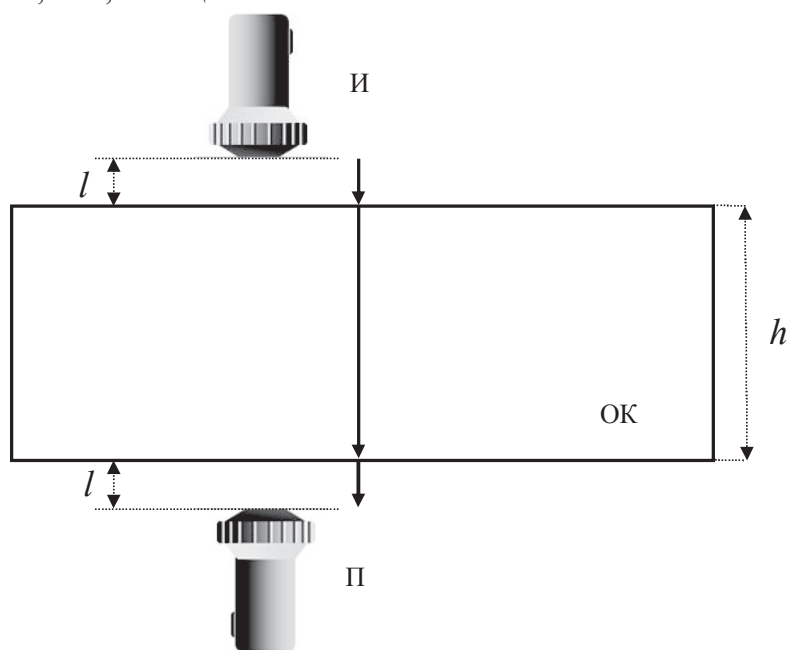


Рис. 5.17. Схема контроля с использованием воздушно-акустической связи

Коэффициент прохождения через границу воздух — сталь очень мал

$$\tilde{D} = 3.8 \cdot 10^{-5}.$$

$$\frac{U'}{U} = K \tilde{D} e^{-2\delta l}, \quad (5.1)$$

где $\frac{U'}{U}$ — относительное ослабление сигнала (режим приема—излучения);

l — толщина воздушного слоя.

В формуле (5.1) не учитывается толщина контролируемого металла, т. к. затухание в воздухе намного выше, чем затухание в материале. Амплитуда принимаемого сигнала

$$U' = MT' = KNU,$$

где M — коэффициент пропорциональности;

T' — механические напряжения на поверхности пьезопластины;

K — коэффициент двойного преобразования;

N — функция затухания.

Рассмотрим следующий пример. Пусть необходимо провести контроль изделия на частоте $f = 40$ кГц через слой воздуха с коэффициентом затухания $\delta = 0.03 \text{ м}^{-1}$ и толщиной $l = 1$ см. В таком случае $e^{-2\delta l} \approx 1$, $\frac{U'}{U} = K\tilde{D} = 2 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, принимаемый сигнал осла-

блен по амплитуде в $2 \cdot 10^5$ раз. Вследствие этого воздушно-акустическая связь обычно используется для контроля изделий с малой толщиной. Чтобы повысить коэффициент прозрачности, в промежуток между объектом контроля и датчиком в некоторых случаях вводят пенопласт. Воздушно-акустическая связь применяется на низких (килогерцовых) частотах ультразвука и только для тонких слоев металла, кратных четверти длины волны. Указанным способом контролируют листовой прокат.

Термоакустический эффект. Для реализации термоакустического эффекта в качестве излучателей необходимо использовать специальные (не пьезоэлектрические) преобразователи. В этом случае источником акустических колебаний является нагретый локальный участок контролируемого объекта. Из-за теплового расширения при нагреве возникают упругие смещения, распространяющиеся в виде волн. Нагрев осуществляется бесконтактно, например, электрической искрой или лучом импульсного лазера. Схема возникновения термоиндуцированных акустических колебаний приведена на рис. 5.18.

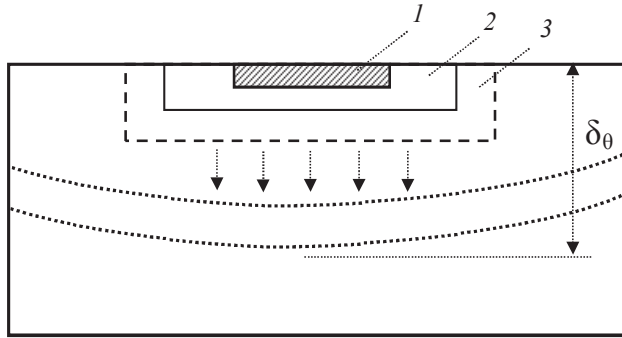


Рис. 5.18. Термоакустический эффект:

1 — нагретая область; 2 — область механических напряжений;
3 — распространение акустической волны с плоским, а затем со сферическим фронтом; δ_θ — толщина прогреваемого слоя

Глубина проникновения тепловой волны определяется по формуле

$$\delta_\theta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}.$$

Амплитуду возникающего термомеханического напряжения определяют как

$$T = \frac{E\alpha\Delta\theta}{1-2\nu} \left(1 + i \frac{C_l^2}{\omega a} \right)^{-1},$$

где E — модуль упругости;

α — коэффициент термического расширения материала;

$\Delta\theta$ — перепад температур между областями 1 и 2;

ν — коэффициент Пуассона;

ω — циклическая частота изменения температуры;

a — коэффициент температуропроводности.

Для того чтобы возник термоакустический эффект, точка регистрации ультразвукового сигнала должна быть удалена от нагретой области на расстояние $h > \delta_\theta$ (h — толщина изделия). Рассмотрим пример.

Если локальный участок изделия нагревается на $\Delta\theta = 100$ К, а частота регистрируемых колебаний составляет $f = 10$ МГц, то величина термомеханических напряжений (амплитуда акустической волны) приблизительно равна напряжению при использовании пьезоэлектрических преобразователей $T_\theta = T_{\text{пзп}}$. Если же $\Delta\theta = 10$ К, $f = 1$ МГц,

то $T_0 = \frac{T_{\text{пэп}}}{100}$. Таким образом, более высокий перепад температур обе-

спечивает большую амплитуду акустического сигнала.

Для реализации термоакустического эффекта используют следующие способы бесконтактного нагрева.

1) Электроискровой нагрев. Осуществляется за счет электрического разряда через воздушный зазор. Эффективность такого способа возбуждения и передачи акустических колебаний невысока. Амплитуда механических напряжений, достигаемая электроискровым разрядом, меньше, чем при использовании пьезоэлектрического преобразователя в 10^4 раз.

2) Лазерный нагрев. Амплитуда механических напряжений при лазерном нагреве превышает напряжения, достигаемые с использованием пьезоэлектрических преобразователей в 10^3 – 10^4 раз. Коэффициент отражения лазерного излучения от поверхности металла R обычно имеет значение около 0.8. Основная проблема при использовании лазерного нагрева состоит в малой длительности лазерного импульса $\tau_{\text{л}} \sim 1 \dots 10$ нс. Вследствие этого происходит уширение спектра импульса, что предъявляет дополнительные требования к полосе пропускания усилителя. Указанную проблему решают путем использования специальных модуляторов лазерного излучения.

3) Нагрев с помощью пучка электронов. Нагрев осуществляется электронными пушками с длительностью импульса $\tau \sim 10$ нс и плотностью электронов 10^{13} см $^{-2}$. Энергия электронов составляет 300 кэВ. Управление этим процессом осуществляется легче, чем при лазерном нагреве. Главный его недостаток — сложность и большие габариты установок, повышенные требования к технике безопасности. В качестве источников электронов используют сегнетоэлектрики, которые испускают электроны высоких энергий при нагреве.

Термоакустический эффект необратим, т. е. используется только для излучения, поэтому бесконтактный прием акустических сигналов осуществляется на основе других принципов, например, с помощью лазерного интерферометра (рис. 5.19). Условие интерференции заключается в равенстве разности хода лучей в плечах интерферометра нечетному числу четвертей длин волн света. В этом случае реализуется линейная зависимость между амплитудой лазерного излучения $A_{\text{ОПТ}}$ и акустического колебания $A_{\text{АКУСТ}}$ в объекте контроля $A_{\text{ОПТ}} \propto A_{\text{АКУСТ}}$. Зондирую-

щий луч лазера падает на объект контроля, отражается от него и попадает на фотоприемник. Опорный луч через систему зеркал попадает в эту же точку. В ФЭУ происходит интерференция эталонного луча 2 и зондирующего 1. Диапазон используемых частот фотоприемника — 50 кГц — 10 МГц. Недостаток метода состоит в том, что при использовании в качестве приемника ФЭУ, точность метода падает, т. к. собственные шумы ФЭУ эквивалентны весьма большому смещению поверхности изделия порядка $5 \cdot 10^{-12}$ м. Чувствительность этого метода оказывается на два порядка ниже, чем у контактного пьезоэлектрического способа.

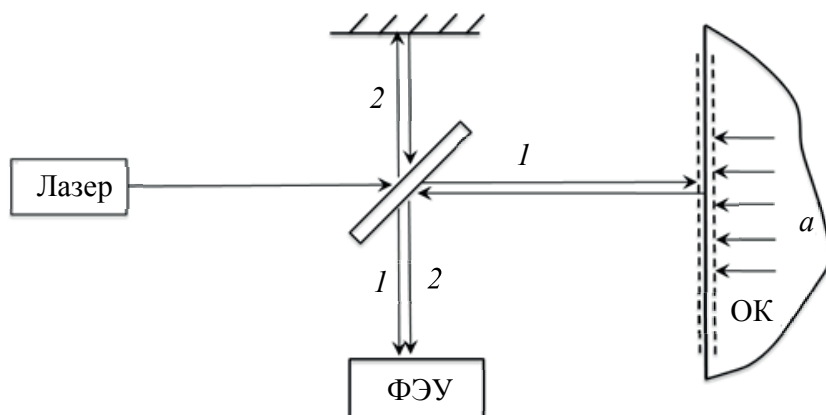


Рис. 5.19. Прием УЗ с помощью лазерного интерферометра:

a — акустическое поле внутри объекта (импульсный режим);

ФЭУ — фотоприемник

Эффект электрического поля. В этом случае используется электростатическое взаимодействие пластины-электрода с объектом контроля (рис. 5.20). Генератор переменного напряжения периодически заряжает пластину и создает электрическое поле в зазоре между пластиной и ОК. При этом силы электростатического взаимодействия возбуждают продольную упругую волну в изделии. Между пластиной и объектом контроля может быть помещен слой диэлектрика. Амплитуда упругих механических напряжений в данном случае в 10^3 раз меньше напряжений, возникающих при пьезоэлектрическом методе. Преимущество эффекта электрического поля состоит в возможности бесконтактного ввода и приема акустических колебаний в широком диапазоне частот. Эффект используется для контроля проводящих изделий, зазор h нужно поддерживать минимальным, обычно он составляет десятые доли миллиметра.

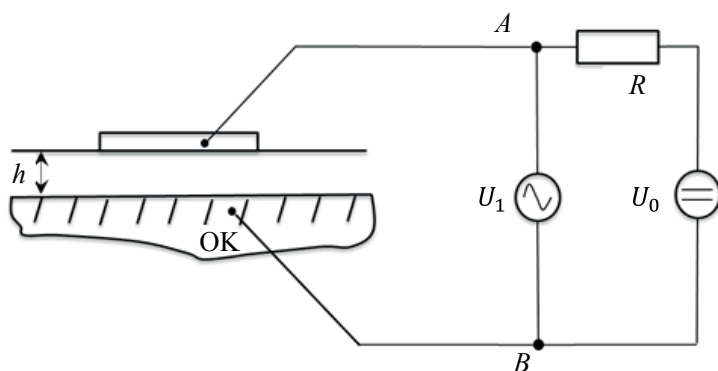


Рис. 5.20. Эффект электрического поля при излучении УЗ

Эффекты электромагнитного поля. Под эффектами магнитного поля здесь понимаются следующие магнитные явления:

- намагничивание;
- магнитострикция (изменение размеров под действием внешнего магнитного поля);
- магнитодинамический эффект (эффект вихревых токов).

На эффекте вихревых токов основано электромагнитно-акустическое преобразование (ЭМАП) (рис. 5.21, 5.22).

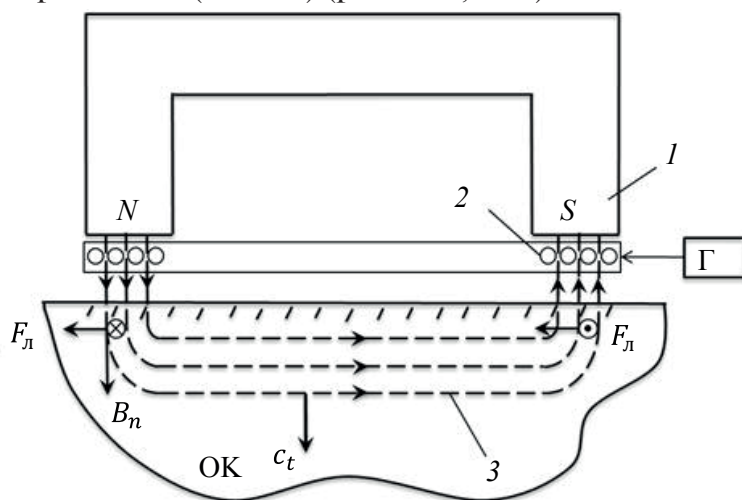


Рис. 5.21. Схема электромагнитно-акустического преобразователя для поперечных волн:

I — постоянный магнит; 2 — высокочастотная катушка; 3 — силовые линии магнитного поля; Г — генератор с частотой 10 МГц; F_L — сила Лоренца; B_n — нормальная составляющая магнитного поля.

Направление тока меняется с частотой 1 МГц

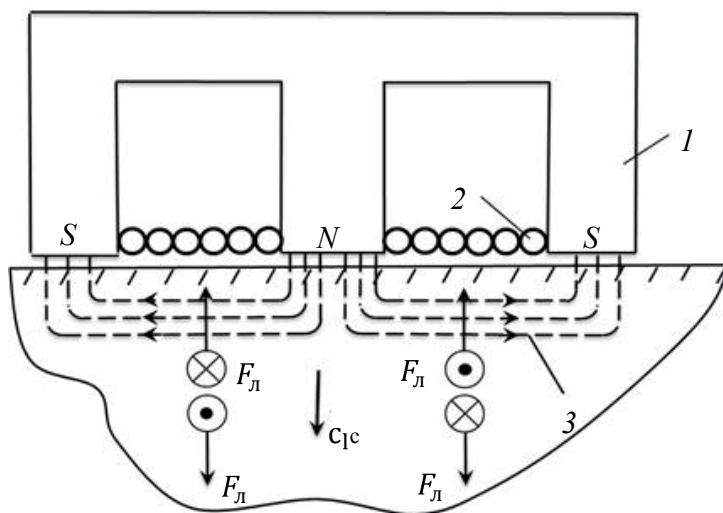


Рис. 5.22. Схема электромагнитно-акустического преобразования для продольных волн

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки. При изменении направления магнитного поля, вектор силы $\vec{F}_л$ разворачивается. Катушка возбуждает в материале вихревые токи — токи Фуко.

От кольцевого излучателя идет плоская волна поперечного типа со скоростью c_t . Сила Лоренца (усредненная) составляет

$$\vec{F} = [\vec{j} \times \vec{B}_n]. \quad (5.2)$$

Из уравнения (5.2) видно, что смещение точек упругой среды происходит по касательной к поверхности — возбуждаются поперечные акустические волны. Возникновение кольцевого излучения обеспечивает высокую направленность поля излучения. Можно регистрировать далекие дефекты. При этом высока и фронтальная разрешающая способность.

В режиме приема акустические колебания вызывают изменения напряженности электрического поля (если изначально электрическое поле отсутствовало)

$$\vec{E}' = [\vec{v} \times \vec{B}_n],$$

где \vec{v} — колебательная скорость (меняется в данном методе по периодическому закону).

Изменение колебательной скорости проводника в магнитном поле обеспечивает получение сигнала. Такой преобразователь может использоваться на прием и излучение колебаний.

Подробный анализ позволяет получить выражение для поперечной напряженности электрического поля над объектом

$$E_t = \frac{2HB_n^2}{\rho c_t},$$

где H — амплитуда переменного магнитного поля;

ρc_t — импеданс.

Излучателем и приемником ультразвука является сама поверхность металла, расположенная в области высокочастотной катушки. Этим способом можно бесконтактно возбудить поперечную волну. Изменяя электрические параметры катушки и сдвиг фаз в обмотках, можно управлять направлением распространения волны.

Продольная составляющая электрического поля определяется по выражению

$$E_l = \frac{2HB_\tau^2}{\rho c_l \mu^2},$$

где B_τ — касательная составляющая магнитной индукции;

μ — магнитная проницаемость контролируемого материала.

Использование продольных и поперечных волн позволяет получить дополнительную информацию не только о дефектах типа несплошностей, но и о микроструктуре, характере и величине остаточных напряжений в металле.

Достоинства ЭМАП:

- 1) стабильный акустический контакт при высокой скорости перемещения контролируемого объекта относительно преобразователя;
- 2) широкополосность при генерации и приеме коротких импульсов;
- 3) возможность контролировать объекты, нагретые до высоких температур;
- 4) возможность приема и излучения поперечных волн перпендикулярно к поверхности. Эта особенность обеспечивает более высокую точность измерения геометрических размеров изделий;
- 5) возможность управлять углом ввода, что обеспечивает возможность бесконтактного возбуждения поверхностных волн Рэлея и волн Лэмба.

Области применения ЭМАП:

- толщинометрия;
- дефектоскопия.

Отсутствие промежуточных слоев и работа с поперечными волнами обеспечивают высокую точность измерений. Использование ЭМАП позволяет автоматизировать процесс контроля. Метод обеспечивает эффективный контроль изделий на высоких скоростях, при этом колебания воздушного зазора не влияют на амплитуду сигнала. Поэтому целесообразно его применение в металлургическом, например трубо-прокатном, производстве.

Несмотря на все положительные стороны ЭМАП, он все же обладает недостатками:

- 1) можно контролировать только электропроводящие материалы;
- 2) габаритные размеры электромагнита достаточно большие;
- 3) пониженный коэффициент двойного преобразования. Причина этого — пониженный коэффициент электромеханической связи. Необходимо возбуждать акустические и электрические импульсы колебаний достаточной мощности. По сравнению с пьезопреобразователями, коэффициент преобразования меньше в 10^3 – 10^4 раз;
- 4) метод работает стабильно, если зазор между преобразователем и объектом контроля не более 5 мм.

Контрольные вопросы

1. Что такое электроакустический преобразователь? Перечислите основные типы преобразователей.
2. Охарактеризуйте физику явления пьезоэлектрического эффекта. Уравнениями какого вида он описывается?
3. По какому признаку и на какие группы делятся пьезоматериалы? Приведите примеры.
4. Какие типы преобразователей различают в зависимости от способа акустического контакта с изделием? Перечислите основные различия между ними.
5. Запишите формулу для добротности ультразвукового преобразователя. Поясните все обозначения.
6. Для чего нужно обеспечить максимальную ширину полосы частот преобразователя? Какими способами это можно осуществить?

6. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Параметры акустического поля преобразователя являются важнейшими характеристиками приборов ультразвуковой дефектоскопии. В наиболее простых случаях для описания полей пользуются геометрической акустикой. Однако зачастую этой теории недостаточно для описания наблюдаемых явлений. В таком случае используют понятия и математический аппарат волновой акустики.

Акустическим полем называют область пространства, упругие колебания в точках которого определяются их положением относительно объекта, порождающего это поле: излучателя, отражателя, границы раздела сред и т. д. Применительно к преобразователю различают поле излучения $I_{\text{и}}$, поле приема $I_{\text{п}}$, поле излучения-приема $I_{\text{ип}}$.

Акустическое поле излучения преобразователя определяется по давлению (действующей компонентой тензора напряжений), которое создается преобразователем и действует на элементарный приемник в произвольной точке пространства. Поле излучения преобразователя определяет амплитуду и фазу колебаний в некоторой точке пространства.

Поле приема определяет амплитуду и фазу колебаний приемного преобразователя при действии на него точечного ненаправленного сферического излучателя, находящегося в некоторой точке пространства.

Поле излучения-приема определяется сигналом приемного преобразователя, возникающим при отражении излучения этого же преобразователя от точечного отражателя, помещенного в некоторой точке пространства и равномерно рассеивающего падающие волны по всем направлениям.

Исходя из того что пьезомодули прямого и обратного пьезоэффекта не равны между собой, естественно ожидать, что поле излучения не равно полю приема пьезоэлектрического преобразователя (6.1), но интенсивности этих полей пропорциональны:

$$I_{\text{ип}} = I_{\text{и}} I_{\text{п}} \propto I_{\text{и}}^2. \quad (6.1)$$

Параметры акустического поля зависят от следующих факторов:

- размера преобразователя;
- конструкции преобразователя;
- типа преобразователя;
- рабочей частоты колебаний;
- длительности импульса;
- свойств упругой среды, в которой создается поле.

6.1. Поле преобразователя произвольной формы

Будем считать длительность акустических импульсов настолько большой, что колебания во время импульса можно считать непрерывными. В то же время длительность импульса достаточно коротка для того, чтобы прием и излучение колебаний происходили в разные промежутки времени. В этом случае поле излучения может быть представлено как результат действия множества точечных излучателей на поверхности пьезопластины произвольной формы (рис. 6.1).

На данной схеме пьезопластина прижата к горизонтальной поверхности объекта контроля. Поверхность излучающей пьезопластины представлена как совокупность точечных источников ультразвука. Поле элементарного источника A , имеющего сферический фронт, запишется в виде выражения

$$P = ia^2 V_0 \rho \omega (e^{i(kx - \omega t)} / r),$$

где P — акустическое давление;

a — радиус источника (очень мал);

ρ — плотность среды;

r — радиус фронта.

Пусть dS_A — элемент пластины (источника), тогда его можно выразить через площадь излучающей полусферы

$$dS_A = 2\pi a^2.$$

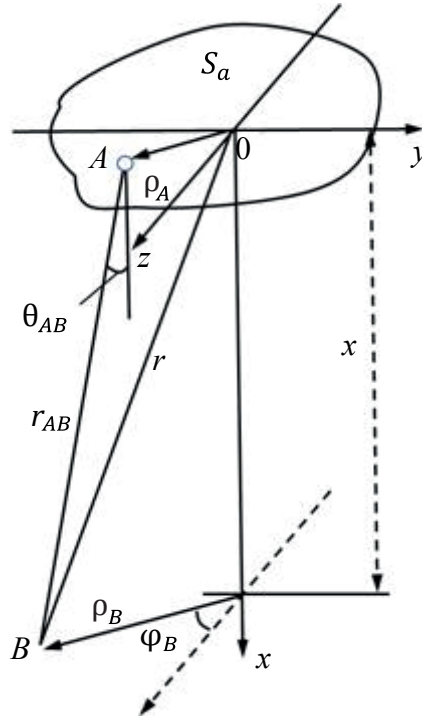


Рис. 6.1. Схема для расчета поля излучения преобразователя произвольной формы:

S_A — площадь источника; A — элементарный источник; B — произвольная точка среды; ρ_A, ρ_B — радиус-вектор; r — радиус фронта; θ_{AB} — угол между r_{AB} и нормалью к поверхности пьезопластины; r_{AB} — расстояние от точки A преобразователя до точки B элементарного отражателя в объекте контроля; ϕ_B — угол между осью Oz' и радиус-вектором

Акустическое давление в точке B

$$P_B = iP_0(1/\lambda) \iint_{S_A} \chi(\theta_{AB}) (e^{ikr_{AB}} / r_{AB}) dS_A,$$

где P_0 — давление в точке A (на границе полусферы);

$\chi(\theta_{AB})$ — множитель, характеризующий направленность излучения элементарного источника:

- при излучении в жидкости в отсутствие сдвига $\chi(\theta_{AB}) = \cos(\theta_{AB})$;
- при излучении в твердую среду и $\theta_{AB} \approx 60^\circ$ $\chi(\theta_{AB}) \leq 1$;
- $\chi(\theta_{AB}) = 0$ при $\theta_{AB} > 60^\circ$. В этом случае амплитуда оказывается малой;
- для прямых преобразователей считают, что $\chi = 0$.

Формула справедлива в случае $r_{AB} \gg 1$, т.е. в случае рассмотрения ультразвукового поля в дальней зоне. Уравнение не учитывает ни формы, ни длительности акустического импульса.

Поле приема — это зависимость амплитуды от координаты точки, в которой расположен приемник. Пусть излучение точечного источника B принимается точечным приемником A (рис. 6.1):

$$P_A = i(B'_B S_B / \lambda r_{BA}) e^{ikr_{BA}} ;$$

$$P' = (1 / S_A) \iint_{S_A} \chi'(\theta_{BA}) P_A dS_A , \quad (6.2)$$

где P' — среднее давление.

$$P'_A = i(P'_B S_B / S_A) \frac{1}{\lambda} \iint_{S_A} \chi'(\theta_{BA}) \frac{e^{ikr_{BA}}}{r_{BA}} dS_A , \quad (6.3)$$

где χ' характеризует чувствительность точечного приемника A , которая зависит от направления падающей волны. Вблизи акустической оси преобразователя $\chi' \approx 1$. Из сравнения выражений (6.2) и (6.3) видно, что подынтегральные выражения в уравнениях поля излучения и поля приема совпадают с точностью до множителей χ и χ' , следовательно, поле излучения и поле приема пропорциональны, т.е. $P'_A \sim P_B$.

Можно обозначить поле излучения-приема в общем виде

$$P = (S_B / S_A) P_0 I^2 ,$$

где S_B / S_A — коэффициент пропорциональности, учитывающий отношение площади излучателя к площади преобразователя;

P_0 — амплитуда давления в режиме излучения;

I — подынтегральное выражение для совмещенного преобразователя.

Если $S_A = S_B$, то можно говорить об одном поле — поле излучения-приема.

Для расчета акустического поля преобразователей различной формы (типа) необходимо прежде всего проанализировать функцию I .

6.2. Поле дискового преобразователя

Рассмотрим поле преобразователя дискообразной формы. Будем рассматривать поле на оси преобразователя (рис. 6.2).

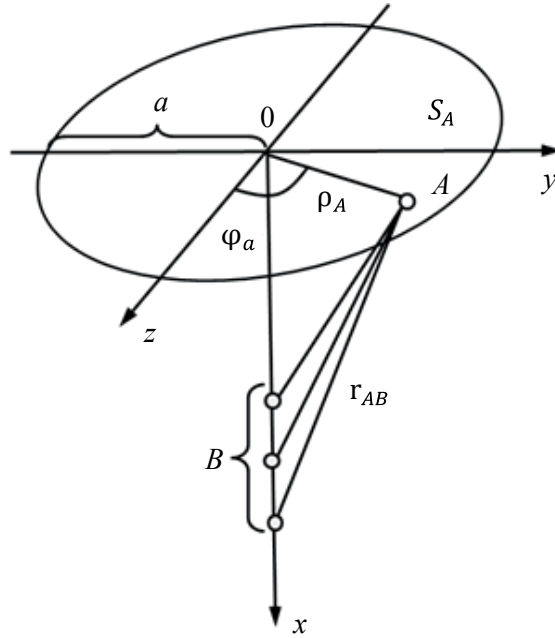


Рис. 6.2. Схема для расчета поля дискового преобразователя:

A — элементарный источник; B — произвольная точка среды; S_A — площадь источника; ρ — радиус-вектор; φ_A — угол между осью Ox и радиус-вектором; a — радиус преобразователя дискообразной формы; r_{AB} — расстояние от точки A преобразователя до точки B элементарного отражателя в объекте контроля

$$r_{AB}^2 = x^2 + \rho_A^2;$$

$$r_{AB} dr_{AB} = \rho_A d\rho_A;$$

$$\chi(\theta_{AB}) \approx 1.$$

$$I = (1/\lambda) \int_0^{2\pi} d\varphi_A \int_0^a (e^{ikr_{AB}} / r_{AB}) \rho_A \cdot d\rho_A = i \left(e^{ik\sqrt{x^2+a^2}} - e^{ikx} \right);$$

$$I = 2 \sin \left[(k/2) \left(\sqrt{x^2 + a^2} - x \right) \right].$$

В случае $a \ll x$ справедливо

$$I = 2 \sin(ka^2 / 4x);$$

$$I = \max : x = a^2 / [(2n-1)\lambda];$$

$$I = \min : x = a^2 / 2n\lambda .$$

Функция I испытывает осцилляции при увеличении x от 0 до x_B :

$$x_B = a^2 / \lambda ,$$

где x_B — граница ближней зоны акустического преобразователя, отвечает значению последнего максимума функции I .

Область пространства перед преобразователем в интервале $0-x_B$ называется ближней зоной (зоной Френеля). Это область акустического поля, где за счет интерференции наблюдается немонотонное изменение амплитуды. Восемьдесят процентов излучаемой энергии дискообразного преобразователя ограничено цилиндром, диаметр которого равен диаметру пьезопластины, а длина — x_B . Энергия в ближней зоне распределена очень неравномерно.

Как показано на рис. 6.3, $0-x_B$ — волна плоская, при $x > x_B$ — волна сферическая. Область монотонного убывания амплитуды, где $x > x_B$, называется дальней зоной (зоной Фраунгофера). В лучевом приближении в дальней зоне поле имеет вид расходящихся лучей из точки эффективного излучающего (акустического) центра. При неравномерной поляризации пьезопластины по радиусу, акустический центр можно сдвинуть за пьезопластину, уменьшая таким образом угол расхождения лучей.

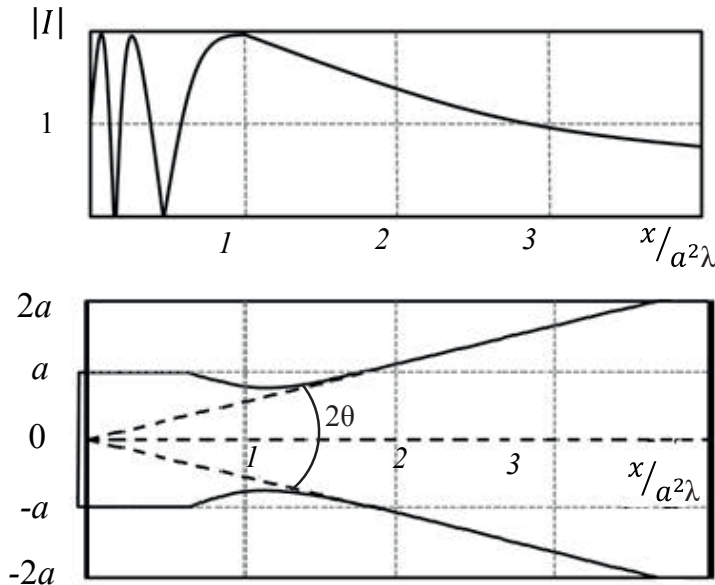


Рис. 6.3. Структура поля преобразователя в зависимости от расстояния на оси:
 θ — угол расхождения

В ближней зоне структура поля характеризуется большой неоднородностью, поэтому вести контроль в ней не рекомендуется. Все измерения осуществляются в дальней зоне. Если дефект находится в ближней зоне, а контроль произвести необходимо, то нужно управлять границей ближней зоны. При ультразвуковом контроле чаще всего используется импульсное излучение. Оно характеризуется спектром частот, имеющим счетное число гармоник. Длительность импульса связана с шириной спектра: чем меньше длительность, тем шире спектр частот, тем сильнее сглаживаются осцилляции амплитуды поля в ближней зоне. Можно подобрать длительность импульса таким образом, что осцилляции исчезнут и структура поля в ближней зоне будет однородной. Но даже в этом случае на границе ближней зоны существует неопределенность по амплитуде, поэтому контроль в этой области вести не рекомендуется.

6.3. Диаграмма направленности

Диаграмма направленности — это зависимость амплитуды акустического поля в дальней зоне от угла между акустической осью и направлением конкретного луча. Акустическая ось — прямая, проведенная через акустический центр в направлении максимума диаграммы направленности. За единицу масштаба принимается амплитуда давления на акустической оси.

$$|I| = (S_A / \lambda r) \Phi;$$

$$\Phi = (2J_1 / ak \sin \theta);$$

$$\sin \theta = (\lambda / a)n.$$

где S_A — площадь преобразователя;

λ — длина волны;

r — расстояние;

Φ — функция, характеризующая направленность поля излучения;

J_1 — функция Бесселя первого порядка;

a — радиус преобразователя;

k — волновое число;

θ — угол расхождения;

n — коэффициент, для круглого преобразователя $n = 0,61$.

Границей поля условно считается геометрическое место точек, где амплитуда падает в 10 раз по сравнению с ее значением на оси, т. е.

на 20 дБ. Ширина диаграммы направленности в дальней зоне поля на практике характеризуется уменьшением амплитуды в 2 раза, т.е. на 6 дБ.

Модуль функции Бесселя первого порядка, определяющий вид функции направленности поля излучения, имеет вид, приведенный на рис. 6.4. Для круглого преобразователя 85 % излучения находится в пределах основного лепестка диаграммы направленности. Характерный вид диаграммы направленности приведен на рис. 6.5. Обычно данная характеристика приводится в паспорте преобразователя.

Акустическое поле на оси круглого преобразователя может быть описано формулой $|I| \approx 2|\sin(\pi a^2 / 2\lambda x)| \approx 2|\sin(ka^2 / 4x)|$.

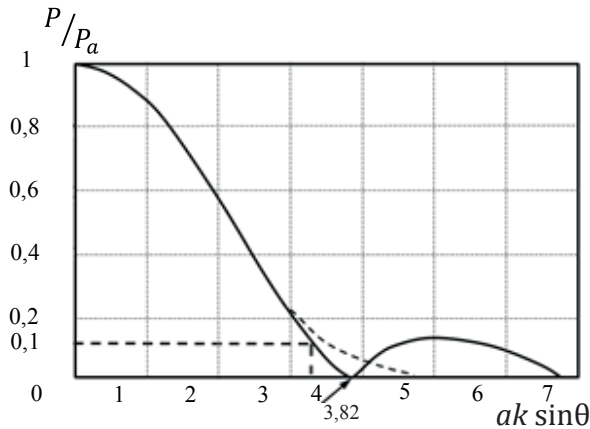


Рис. 6.4. Модуль функции Бесселя первого порядка:

P_A — амплитуда акустического давления на оси преобразователя

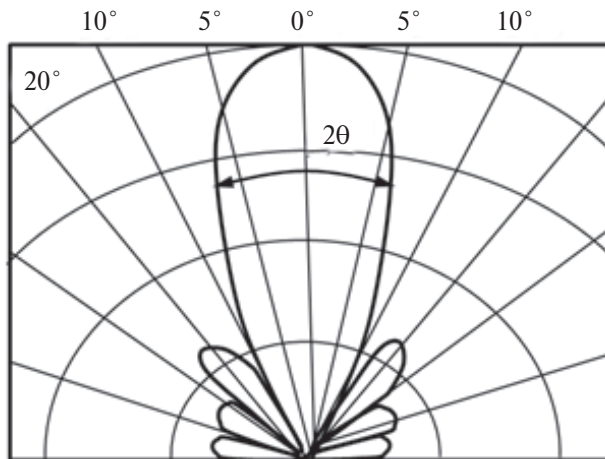


Рис. 6.5. Диаграмма направленности круглого преобразователя

Акустическое поле дискообразного преобразователя показано на рис. 6.6.

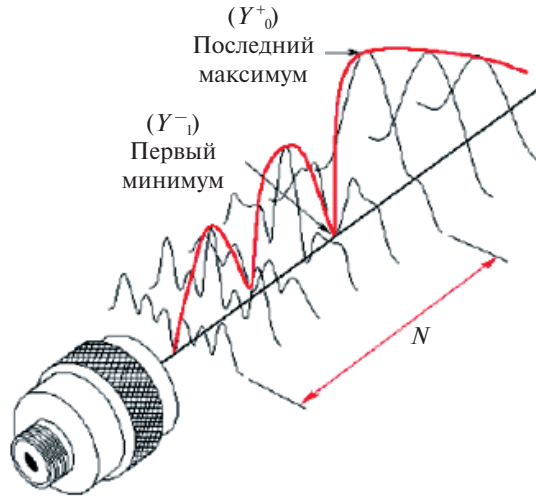


Рис. 6.6. Структура акустического поля дискообразного преобразователя

6.4. Поле кольцеобразного преобразователя

Поле на оси кольцеобразного преобразователя описывается следующим выражением

$$I = 2 \left| \sin \frac{k}{4\pi} (a_H^2 - a_B^2) \right|,$$

где a_H — наружный радиус кольцеобразного преобразователя;
 a_B — внутренний радиус кольцеобразного преобразователя.

Размер ближней зоны

$$X_B = S_A / \pi \lambda = (a_H - a_B) / \lambda.$$

Определим поле кольцеобразного преобразователя в дальней зоне:

$$I = \frac{\pi}{r\lambda} \Phi = \frac{\pi}{r\lambda} \left| a_H^2 \frac{2J_1(ka_H \sin \theta)}{ka_H \sin \theta} - a_B^2 \frac{2J_1(ka_B \sin \theta)}{ka_B \sin \theta} \right|.$$

В предельном случае бесконечно тонкого кольца диаметром $2a$

$$I = \frac{S_a}{r\lambda} |J_0(ak \sin \theta)|,$$

где $J_0(ak \sin \theta)$ — функция Бесселя нулевого порядка.

Кольцеобразный излучатель имеет более узкую диаграмму направленности, чем дисковый излучатель. Боковые лепестки на диаграмме направленности для такого излучателя выражены больше, чем у дискового излучателя, что является причиной увеличения шумов, помех и в ряде случаев появления ложных сигналов. Поэтому на практике такие преобразователи применяются редко. Вместе с тем подобная ситуация возникает при анализе акустического поля круглых пьезопластин переменной толщины или пьезоэлементов с неравномерной поляризацией по радиусу. Указанные варианты пьезопластин можно представить как совокупность кольцевых преобразователей различного диаметра.

6.5. Поле прямоугольного преобразователя

Вид прямоугольного преобразователя представлен на рис. 6.7. Характеристики такого преобразователя зависят от соотношения сторон a_1 и a_2 .

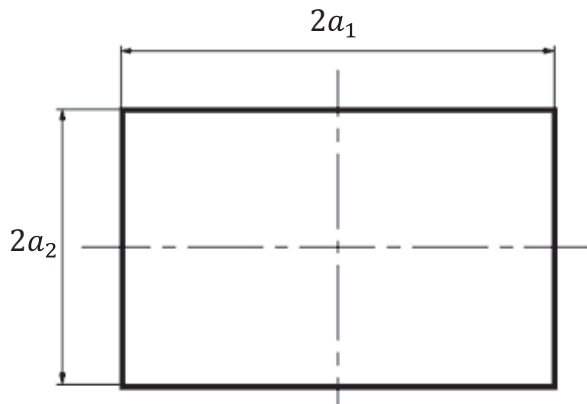


Рис. 6.7. Прямоугольный преобразователь

Размер ближней зоны такого преобразователя определяется по формуле

$$x_B = S_A / (\pi\lambda).$$

Поле прямоугольного преобразователя зависит от безразмерного параметра x / x_B , где x — расстояние, измеряемое по оси преобразователя; x_B — размер ближней зоны.

В общем случае $a_1 \neq a_2$. Зависимость амплитуды поля от расстояния по оси, нормированного на размер ближней зоны, для различных значений отношения a_1 / a_2 показана на рис. 6.8.

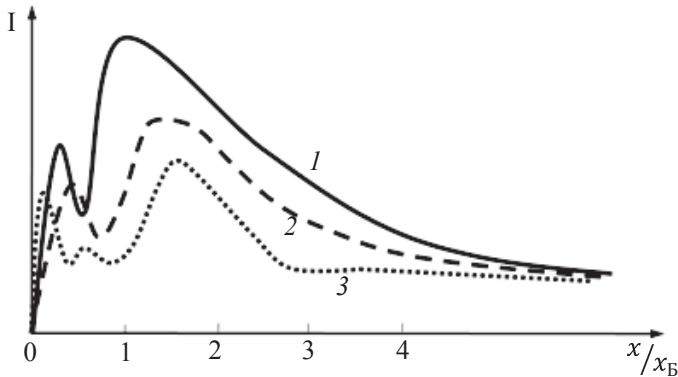


Рис. 6.8. Зависимость поля прямоугольного преобразователя от расстояния на оси, нормированного на размер ближней зоны:

1 — квадратный преобразователь, $a_1 / a_2 = 1$; 2 — прямоугольник, $a_1 / a_2 = 2$;
3 — полоса, $a_1 / a_2 = 5$

Положение последнего максимума амплитуды на оси определяется в соответствии с величиной ближней зоны $x_B = a_1^2 / 2\lambda$ только для квадратного преобразователя $a_1 / a_2 = 1$. Для прямоугольного излучателя с соотношением сторон $(a_1 / a_2) > 2$ положение последнего максимума можно определить лишь приближенно. Условия интерференции для волн в ближней зоне прямоугольного преобразователя отличны от условий для круглого преобразователя.

Сравнение с полем дискообразного преобразователя показывает, что для прямоугольного преобразователя максимумы и минимумы в ближней зоне сильно сглажены. В импульсном режиме наблюдается дополнительное сглаживание с одновременным уменьшением амплитуды.

Поле прямоугольного преобразователя в дальней зоне

$$I = \frac{S}{\lambda r} \frac{\sin(a_1 k \sin \theta_1)}{a_1 k \sin \theta_1} \frac{\sin(a_2 k \sin \theta_2)}{a_2 k \sin \theta_2},$$

где θ_1 и θ_2 — углы между акустической осью преобразователя и проекциями лучей на плоскости XOZ и XOY (рис. 6.9).

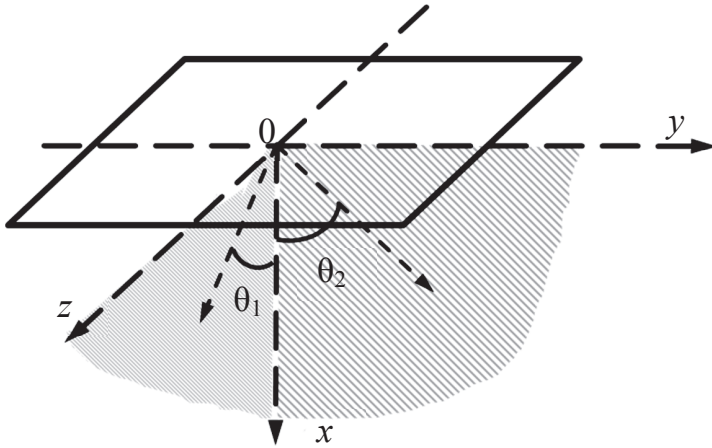


Рис. 6.9. Схема для расчета поля прямоугольного преобразователя:
 θ_1 и θ_2 — углы между акустической осью преобразователя и проекциями лучей
 на плоскости XOZ и XOY

На рис. 6.10 приведены сравнительные диаграммы направленности для преобразователей различной формы.

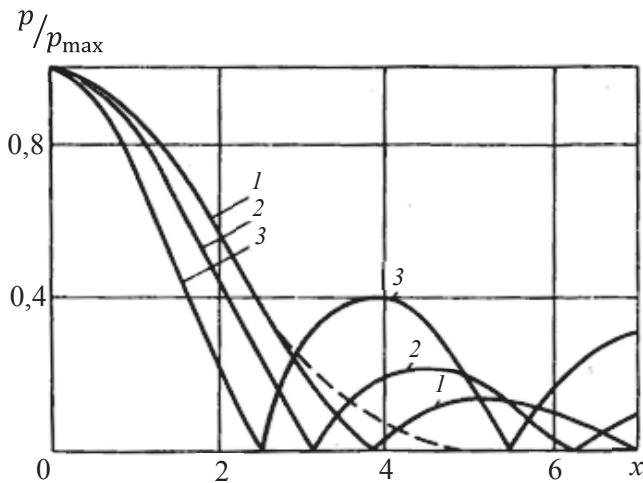


Рис. 6.10. Диаграммы направленности для преобразователей:
 1 — круглого; 2 — прямоугольного; 3 — тонкого кольцеобразного

Как видно по рис. 6.10, диаграмма направленности прямоугольного преобразователя более широкая, чем кольцеобразного преобразователя, но уже, чем круглого.

Прямоугольные преобразователи применяются в тех случаях, когда нужно увеличить зону контроля за один проход преобразователя. Этот вид преобразователей чаще всего используется в автоматизированном контроле.

Основной недостаток прямоугольных преобразователей — неравномерная чувствительность вдоль длинной стороны (следствие интерференции волн в ближней зоне).

Существует несколько способов устранения этого недостатка: сокращение длительности импульса, за счет чего сглаживаются интерференционные максимумы в ближней зоне; расширение полосы частот. Для этого на нерабочей стороне пьезопластины создают треугольные каналы (рис. 6.11, б), изменяют форму пьезопластины (рис. 6.11, а).

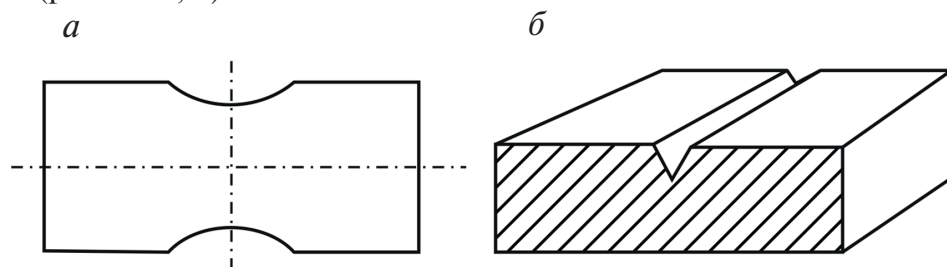


Рис. 6.11. Способы устранения неравномерности чувствительности прямоугольного преобразователя:

а — изменение формы пьезопластины; б — создание треугольных каналов на нерабочей стороне пьезопластины

Изменение формы пьезопластины является наиболее эффективным способом выравнивания чувствительности (применение остальных способов приводит к ухудшению чувствительности). Изменяя форму пьезопластины, можно управлять рабочей частотой преобразователя, добротностью и параметрами акустического поля.

6.6. Поле преобразователя с акустической задержкой

Задержка — среда, на прохождение которой требуется время (протектор, смазка, призма наклонного преобразователя).

Плоскопараллельная задержка. Данный тип задержки чаще всего реализуется при использовании иммерсионного метода. Распространение акустических волн в плоскопараллельной задержке представлено на рис. 6.12.

Упростить расчетную схему можно при использовании представления о мнимом преобразователе: действующий источник излучения A заменяется мнимым источником A_1 (считается, что его лучи не преломляются на границе раздела сред).

Если θ_A и θ_B малы, то $\operatorname{tg} \theta \cong \sin \theta$. С учетом закона Снеллиуса можем произвести переход к соотношениям скоростей волн в контактирующих средах

$$X_1 = X_A n,$$

где n — показатель преломления.

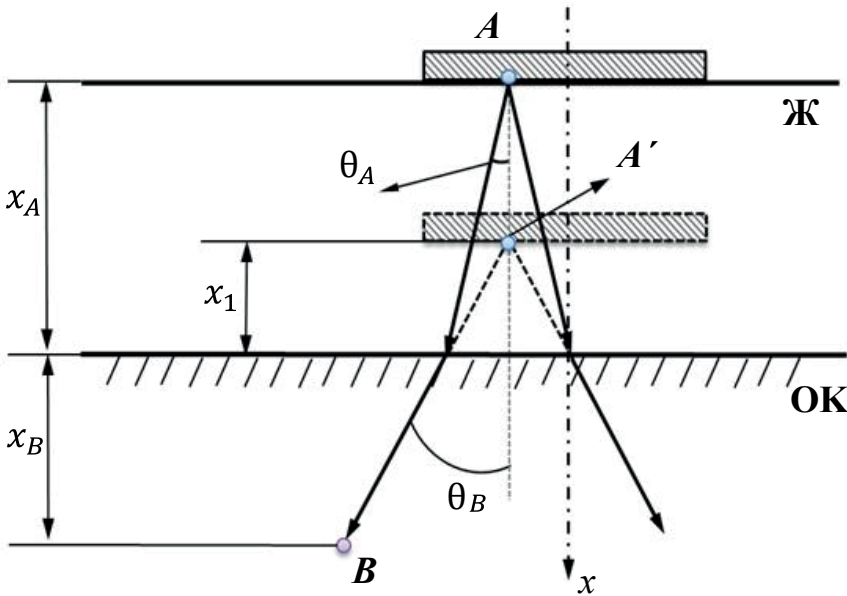


Рис. 6.12. Распространение акустических колебаний в плоскопараллельной задержке:

Ж (I) — жидкость; ОК (II) — объект контроля; X_A — путь ультразвука в жидкости (в задержке); θ_A — угол расхождения лучей в задержке; θ_B — угол преломления лучей в объекте контроля; A — элементарный источник на кварцевой пластине; A' — мнимый источник; X_1 — координаты мнимого источника

Таким образом, при малых значениях углов θ_A и θ_B величина X_1 не зависит от угла θ_A . Если θ_B меньше 25° , то ошибка, связанная с за-

меной источника на мнимый, не превышает десяти процентов, что можно считать допустимым.

Таким образом, в расчетах возможна замена всех точек реальной пьезопластины на точки мнимого преобразователя. В этом случае уравнения акустического поля преобразователя должны быть заменены уравнениями, в которых ко всем значениям пути ультразвука в контролируемом объекте X_B нужно прибавить значение X_1 .

Кроме того, необходимо учитывать акустические свойства реальной среды задержки. Все формулы для расчета поля ПЭП необходимо модифицировать следующим образом: в режиме излучения на границе между средой задержки и контролируемым объектом ввести коэффициент прозрачности по амплитуде D_\downarrow ; при реализации режима излучения-приема необходимо вводить коэффициент преломления по интенсивности (энергии) $\tilde{D} = D_\downarrow D_\uparrow$; учесть затухание, для чего в случае необходимости во все уравнения ввести дополнительный множитель $e^{(-\delta_A X_A - \delta_B X_B)}$; δ_A учитывает расстояние до реального источника излучения. Если контролируется тонкостенное изделие, то можно не учитывать затухание в контролируемой среде $\delta_B \approx 0$.

Наклонная задержка. В данном случае также возможно введение мнимого преобразователя. Точность при этом значительно ниже, чем в прямом преобразователе, также усложняется и схема расчета. Наклонный преобразователь с акустической задержкой (призмой) приведен на рис. 6.13. Считается, что излучатель уменьшается в некоторое число раз.

Введем следующие обозначения: α — угол падения акустической оси; γ — угол преломления акустической оси; n — показатель преломления.

Размер мнимого преобразователя

$$d_1 = d(\cos \gamma / \cos \alpha).$$

Расстояние до мнимого преобразователя

$$X_1 = X_A n(\cos \gamma / \cos \alpha).$$

Поле в дальней зоне определяется по формуле

$$p = \frac{p_0 D S_A (\cos \gamma / \cos \alpha)}{\lambda_B (X_B + X_A n(\cos \gamma / \cos \alpha))} \Phi e^{(-\delta_A X_A - \delta_B X_B)}, \quad (6.4)$$

где Φ — функция направленности поля, характеризующая мнимый источник.

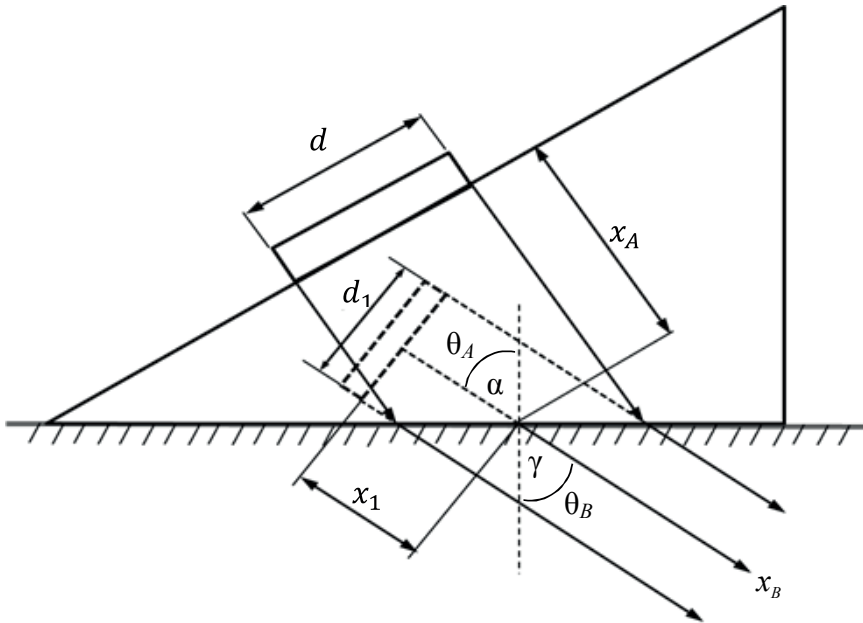


Рис. 6.13. Наклонная задержка:

d — диаметр преобразователя; d_1 — диаметр мнимого преобразователя;
 X_A — средний путь в призме; θ_A — угол расхождения лучей в призме; θ_B — угол
 преломления лучей в изделии; X_B — направление ультразвука в изделии;
 X_1 — расстояние от поверхности изделия до мнимого излучателя

Мнимый источник меньше действительного в m раз

$$m = \cos \gamma / \cos \alpha.$$

Акустическое поле в плоскости падения и в плоскости, перпендикулярной акустической оси, имеет разную структуру и различные амплитуды (в сечении для действительного источника поле представляет собой круг, для мнимого источника — овал).

Формула (6.4) дает достаточное совпадение с экспериментом, если угол падения попадает в интервал между первым и вторым критическим углом. В этом интервале изменение D невелико.

При использовании наклонного преобразователя наблюдаются три эффекта:

1) вблизи критических углов наблюдается отклонение от закона Снеллиуса, при этом искажается поле в объекте контроля. В итоге максимум плотности излучения в объекте контроля и направление акустической оси

не совпадают (рис. 6.14). Несовпадение акустической оси и центрального луча, соответствующего максимуму диаграммы направленности, объясняется тем, что при некоторых значениях угла падения α , близких к критическим, коэффициент прозрачности \tilde{D} быстро изменяется. При прохождении через границу раздела меньше ослабляются лучи диаграммы направленности, соответствующие большему значению \tilde{D} . Отклонение экспериментального значения угла преломления (для центрального луча) от теоретического (рассчитанного по закону синусов) происходит в сторону углов, для которых значение \tilde{D} больше. Углом ввода называют угол преломления центрального луча. Увеличение волнового размера пьезопластины (ak , где a — радиус пьезопластины) приводит к сужению диаграммы направленности в призме и ослаблению описанного эффекта. Увеличение угла призмы в свою очередь приводит к усилению данного эффекта;

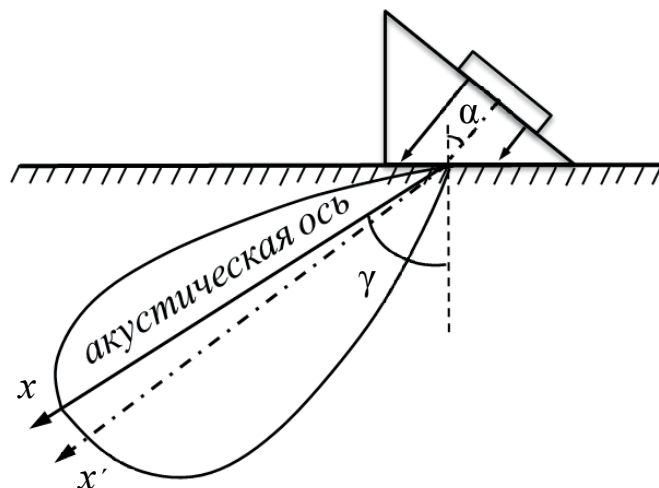


Рис. 6.14. Отклонение от закона Снеллиуса вблизи критического угла падения акустической оси:

α — угол преломления лучей в призме; γ — угол преломления лучей в среде;
 x — реальная ось ввода луча; x' — теоретическая ось ввода луча

2) в случае, когда боковые лепестки диаграммы направленности достаточно велики (рис. 6.15), возможно ухудшение чувствительности контроля за счет возникновения дополнительных шумов. Причиной их возникновения является отражение лучей боковых лепестков от различных препятствий в объекте контроля: дефектов, стенок, дна. Как следствие, возникают ложные сигналы, мешающие проведению контроля. Определить этот эффект можно с помощью демпфирования;

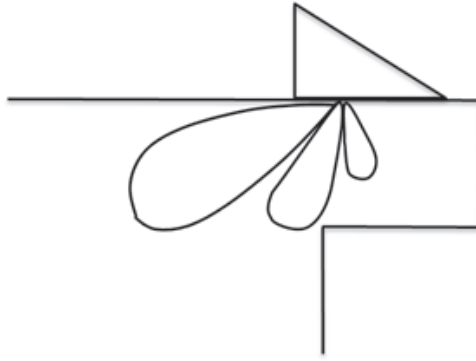


Рис. 6.15. Возникновение ложных сигналов при больших боковых лепестках диаграммы направленности наклонного преобразователя

3) чем больше угол ввода, тем сильнее будут сглаживаться осцилляции амплитуды в ближней зоне. Возникает деформация диаграммы направленности (рис. 6.16); эффект проявляется тем сильнее, чем меньше произведение af , где f — частота; a — радиус пьезопластины.

При этом сильного влияния угла ввода на фронтальную разрешающую способность не наблюдается.

Если в общем случае диаграмма направленности узкая, то эффект деформации диаграммы будет слабо выражен. Для широких диаграмм такой эффект выражен более ярко.

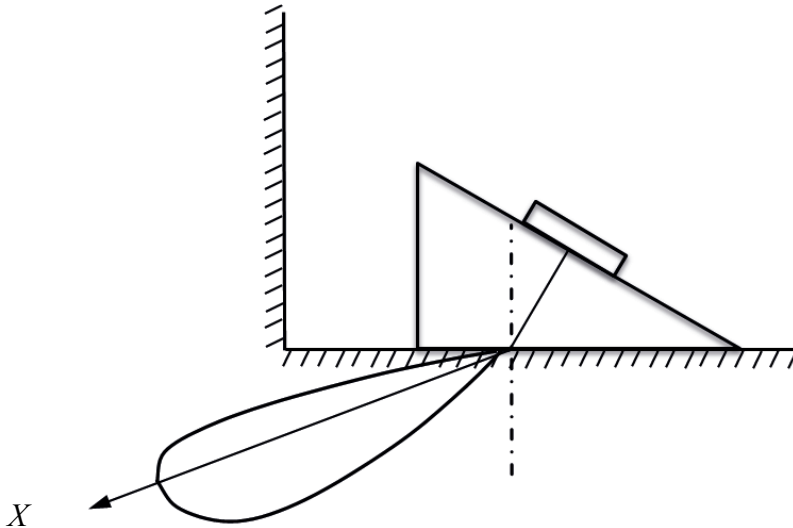


Рис. 6.16. Деформация диаграммы направленности (X — ось ввода луча)

Контрольные вопросы

1. Что такое акустическое поле преобразователя? От каких факторов зависят его параметры?
2. В чем отличие полей излучения и приема преобразователя?
3. Запишите выражение для поля излучения преобразователя произвольной формы. Объясните все обозначения.
4. Что характеризует диаграмма направленности преобразователя?
5. Сравните диаграммы направленности для круглого, кольцеобразного и прямоугольного преобразователей. Перечислите их основные различия и области применения.
6. В каких случаях применяется акустическая задержка? Как изменяется расчет акустического поля преобразователя с учетом задержки?
7. Как рассчитывается поле преобразователя с плоскопараллельной и наклонной задержками? Где реализуются эти два случая?

7. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Обнаружить и измерить дефект, оценить степень его допустимости для данной конструкции — в этом состоит главная задача ультразвукового контроля. Однако в полной мере эта задача не может считаться решенной по двум основным причинам. Первая причина — это большое разнообразие дефектов по отражательным свойствам, ориентации и расположению; вторая причина — ограниченная информативность реальных методик при определении природы (дешифровке) дефекта.

Полную информацию о размерах, ориентации и характере дефекта можно получить, если проанализировать амплитудно-частотное распределение рассеянного от дефекта УЗ-поля в различных пространственных направлениях, т. е. получить диаграмму направленности дефекта на различных частотах ультразвука. Такая пространственная диаграмма распределения отраженного от дефекта поля получила название *индикатрисы рассеяния*. Этот термин используется и при описании рассеянного поля дефекта на рабочей частоте.

При контроле совмещенным преобразователем регистрируется только та часть энергии УЗ-импульса, которая возвратилась обратно к преобразователю, т. е. измеряется индикатриса обратного рассеяния. Пространственно-структурная форма индикатрисы рассеяния зависит от соотношений между параметрами акустического тракта (длина волны, длительность импульса, ширина пучка, ракурс озвучивания), с одной стороны, и размерами, конфигурацией, степенью шероховатости поверхности дефекта — с другой.

Эти параметры дефекта определяют его характер с акустической точки зрения.

На практике полный амплитудный анализ индикатрисы обратного рассеяния, включающий проведение большого числа измерений в отдельных характерных точках и направлениях, весьма затруднен. Однако объем измерений не может быть сведен к минимуму из-за опасности потери важной информации о дефекте. Кроме того, необходимо использовать только такие информативные параметры дефекта, которые поддаются воспроизводимому измерению в любых условиях, любым оператором и выражаются в достаточно простой форме.

При идентификации дефектов обычно используется следующий набор измеряемых характеристик:

- 1) координаты дефекта;
- 2) амплитуда эхосигнала, пропорциональная размеру дефекта в плоскости, перпендикулярной оси ультразвукового пучка;
- 3) условная протяженность, определяемая длиной зоны перемещения преобразователя, в пределах которой фиксируется эхосигнал от выявленного дефекта;
- 4) условная высота, определяемая разностью глубин, измеренных в крайних положениях преобразователя при перемещении его перпендикулярно оси шва. Крайними положениями преобразователя при этом являются положения, соответствующие появлению и исчезновению эхосигнала от дефекта на развертке дефектоскопа; измеряют только при контроле наклонным преобразователем;
- 5) число дефектов, приходящихся на единицу длины;
- 6) условное наименьшее расстояние между дефектами, которое измеряется длиной зоны, в пределах которой не фиксируются эхосигналы от выявленных дефектов.

Для оценки характера дефекта (компактный, плоскостной, протяженный) необходимо использовать дополнительные информативные признаки.

7.1. Модели дефектов

Естественные дефекты в изделии могут иметь различную форму, ориентацию и акустические свойства, которые заранее неизвестны, поэтому при анализе эхометода формулы акустического тракта выводят для моделей дефектов в виде полых отражателей простой формы:

тонкого диска, сферы, цилиндра, тонкой полосы, плоскости. Физическая реализация некоторых моделей дефектов представляет большие технологические трудности, поэтому при экспериментах и производственном контроле модели дефектов заменяют искусственными отражателями: диск — плоскодонным отверстием, сферу — отверстием со сферическим дном и т. д. Амплитуды эхосигналов от моделей дефектов и искусственных отражателей мало отличаются, когда их размеры больше длины волны ультразвука. В противном случае амплитуды эхосигналов могут не совпадать. Наиболее широкое распространение нашел искусственный дефект типа плоскодонного отверстия, который удовлетворительно моделирует небольшие расслоения, трещины. Боковое цилиндрическое отверстие имитирует протяженные шлаковые включения, цепочки пор. Протяженная плоскость соответствует донному сигналу, по которому удобно выполнять настройку, а также имитирует протяженные расслоения. Цилиндрическую вогнутую поверхность используют в стандартных образцах для получения максимального эхосигнала и определения точки ввода преобразователя.

7.2. Расчет акустического тракта для случая прямого преобразователя

Акустическим трактом называют путь ультразвукового сигнала от излучателя до дефекта или отражателя и далее к приемнику колебаний (излучатель — протектор — жидкость — ОК — дефект — ОК — жидкость — протектор — приемная пьезопластина).

В акустическом тракте могут возникать следующие эффекты: ослабление в протекторе, отражение, преломление, трансформация на границе ОК и на дефекте, затухание (поглощение, рассеяние) при распространении ультразвука в контролируемой среде.

На амплитуду полезного сигнала оказывают влияние различные факторы: форма дефекта, его размеры, ориентация дефекта в ОК. Рассчитать акустический тракт означает определить амплитуду полезного сигнала в зависимости от формы, размера дефекта, размера преобразователя, глубины залегания дефекта, акустических свойств материала и частоты колебаний.

В ультразвуковой дефектоскопии получены формулы акустического тракта для отражателей простой геометрической формы. Чтобы приме-

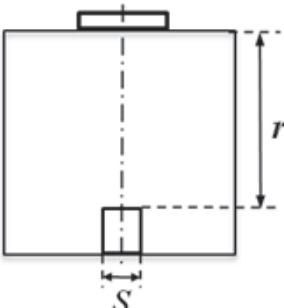
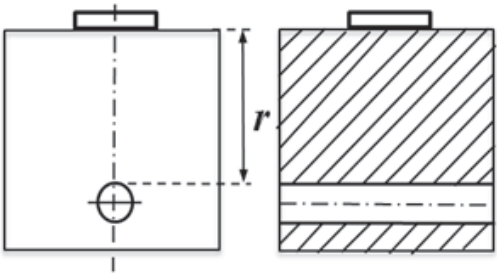
нить данные формулы к дефектам (отражателям) более сложной формы, вводят понятие эквивалентного размера дефекта.

Расчет акустического тракта в дальней зоне. Для модельных отражателей, расположенных в дальней зоне, выведены формулы для отношения амплитуд $\frac{A}{A_0}$ зондирующего сигнала и сигнала, отраженного дефектом и принятого преобразователем.

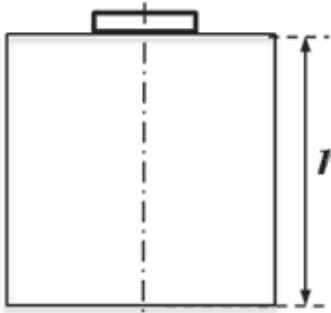
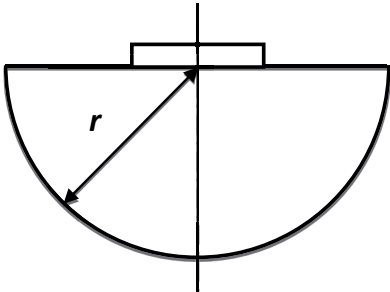
В табл. 7.1 приведены принципиальные схемы и расчетные формулы для нескольких наиболее часто встречающихся моделей отражателей в акустическом тракте прямого преобразователя.

Таблица 7.1

Формулы акустического тракта для прямого преобразователя

Модельный отражатель	Схема отражателя	Формула акустического тракта
Дисковый		$\frac{A}{A_0} = \frac{Ss}{\lambda^2 r^2} e^{-2\alpha r}$
Цилиндрический (боковое сверление)		$\frac{A}{A_0} = \frac{S}{2\lambda} \sqrt{\frac{d}{r^3}} e^{-2\alpha r}$

Окончание табл. 7.1

Модельный отражатель	Схема отражателя	Формула акустического тракта
Плоскодонная поверхность		$\frac{A}{A_0} = \frac{S}{2\lambda r} e^{-2\alpha r}$
Цилиндрическая вогнутая поверхность		$\frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{S}{2\lambda r}} e^{-2\alpha r}$

Примечание. S — площадь излучателя; s — площадь дискового отражателя; λ — длина поперечной волны в изделии; r — расстояние от пьезопластины до отражателя; α — коэффициент затухания в среде; d — диаметр цилиндрического отражателя.

Расчет акустического тракта в ближней зоне. Необходимо помнить, что вышеприведенные формулы для расчета соотношения амплитуд, отраженных от дефектов и зондирующих сигналов, справедливы для дальней зоны.

Для ближней зоны формулы расчета акустического тракта выглядят несколько иначе. Например, для плоскодонного отражателя соотношение

$\frac{A}{A_0}$ в ближней зоне определяется по формуле

$$\frac{A}{A_0} = (1...4) \frac{s}{S} e^{-2\delta r},$$

где коэффициент (1...4) зависит от длительности импульса;

s — площадь дефекта;

S — площадь пьезопластины;

δ — коэффициент затухания в среде;

r — расстояние от ПЭП до дефекта.

При контроле нужно обязательно учитывать положение дефекта. В ближней зоне количественный контроль не ведут. Из-за множителя (1...4) амплитуду отражения в ближней зоне можно оценить лишь приближенно.

7.3. Расчет акустического тракта для случая наклонного преобразователя

При контроле наклонным преобразователем используют искусственные отражатели, подобные применяемым при контроле прямым преобразователем. При этом плоские отражатели располагаются так, чтобы плоскость была ориентирована перпендикулярно акустической оси. Помимо этого, используют также отражатели, дающие большие эхосигналы благодаря угловому эффекту, т. е. двукратному отражению акустических волн от поверхности отражателя и перпендикулярно расположенной к нему поверхности ОК. К таким отражателям относят двугранный угол, зарубку, угловое цилиндрическое отверстие.

В табл. 7.2 приведены принципиальные схемы и расчетные формулы для нескольких наиболее часто встречающихся моделей отражателей в акустическом тракте наклонного преобразователя,

$$x_1 = r_1 \frac{c_l^{\text{пр}} \cos \alpha}{c_l^{\text{изд}} \cos \beta}, \quad (7.1)$$

где r_1 — длина акустической оси в призме;

$c_l^{\text{пр}}$ — скорость продольных волн в призме;

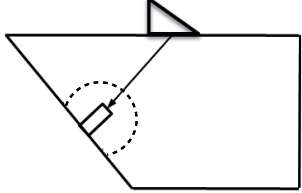
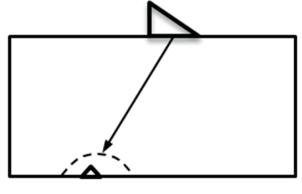
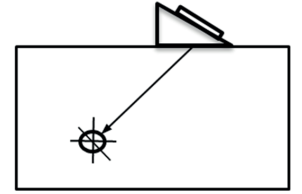
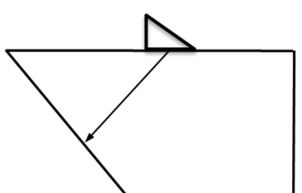
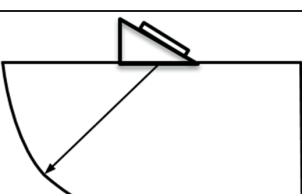
α — угол ввода луча;

$c_l^{\text{изд}}$ — скорость поперечных волн в изделии;

β — угол призмы.

Таблица 7.2

Формулы акустического тракта для наклонного преобразователя

Модельный отражатель	Схема отражателя	Формула акустического тракта
Диск		$\frac{A}{A_0} = D \frac{sS \cos \alpha}{\lambda^2 (r + x_1)^2 \cos \beta} e^{-2(r\alpha_u + \alpha_{\text{пр}}r_1)}$
Сегментный отражатель		$\frac{A}{A_0} = D \frac{sS \cos \alpha}{\lambda^2 (r + x_1)^2 \cos \beta} e^{-2(r\alpha_u + \alpha_{\text{пр}}r_1)}$
Цилиндрическое отверстие (боковое сверление)		$\frac{A}{A_0} = D \frac{S \cos \alpha}{2\lambda \cos \beta} \sqrt{\frac{d}{2(r + x_1)^3}} e^{-2(r\alpha_u + \alpha_{\text{пр}}r_1)}$
Плоскость (донная поверхность)		$\frac{A}{A_0} = D \frac{Sd \cos \alpha}{4\lambda (r + x_1) \cos \beta} e^{-2(r\alpha_u + \alpha_{\text{пр}}r_1)}$
Цилиндрическая вогнутая поверхность		$\frac{A}{A_0} = D \sqrt{\frac{S \cos \alpha}{2\lambda (r + x_1) \cos \beta}} e^{-2(r\alpha_u + \alpha_{\text{пр}}r_1)}$

Примечание. D — коэффициент прозрачности; s — площадь дискового или сегментного отражателя; S — площадь излучателя; α — угол ввода луча; λ — длина поперечной волны в изделии; r — расстояние в изделии от точки ввода до отражателя; x_1 — приведенное расстояние в призме, вычисляемое по формуле (7.1); β — угол призмы; α_u и $\alpha_{\text{пр}}$ — коэффициенты затухания в изделии и призме; r_1 — длина акустической оси в призме; d — диаметр цилиндрического отражателя.

Наиболее широкое применение нашел искусственный дефект типа плоскодонного отверстия. Он удовлетворительно имитирует небольшие расслоения, трещины. Боковое цилиндрическое отверстие имитирует протяженные шлаковые включения, цепочки пор.

Протяженная плоскость соответствует донному сигналу, по которому удобно выполнять настройку. Кроме того, она имитирует протяженные расслоения. Цилиндрическую вогнутую поверхность используют в стандартных образцах для получения максимального эхосигнала и определения точки ввода преобразователя.

При контроле наклонными преобразователями используют искусственные отражатели, подобные применяемым при контроле прямым преобразователем. При этом плоские отражатели располагаются так, чтобы плоскость была ориентирована перпендикулярно акустической оси. Помимо этого, используют отражатели, дающие большие эхосигналы благодаря угловому эффекту, т. е. двукратному отражению акустических волн от поверхности отражателя и перпендикулярно расположенной к нему поверхности контролируемого объекта. К таким отражателям относят двугранный угол, зарубку, цилиндрическое отверстие.

Моделирование дефекта зарубкой для наклонного преобразователя. В качестве модельного отражателя для настройки чувствительности дефектоскопа часто используется зарубка (плоский угловой отражатель) (рис. 7.1).

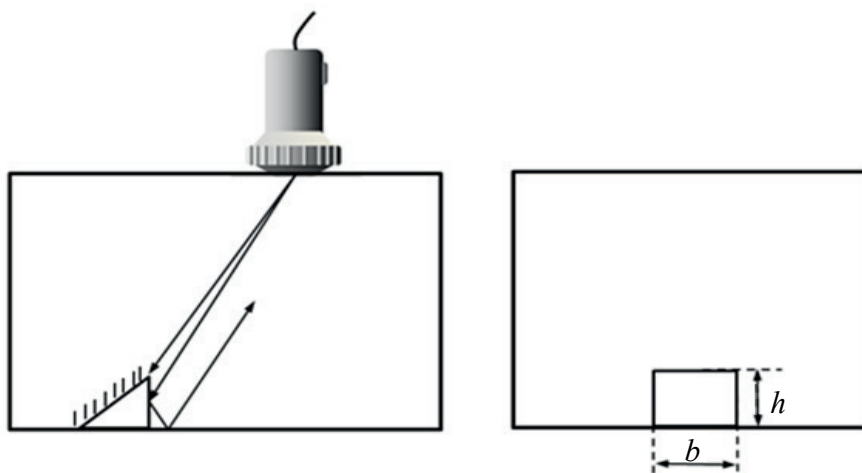


Рис. 7.1. Моделирование дефекта зарубкой для наклонного преобразователя

Зарубкой моделируются дефекты типа вертикальной трещины. Эквивалентный размер дефекта $b \cdot h$. Для проведения контроля и выполнения точных расчетов потребуем выполнения условия

$$h b > \lambda.$$

При падении зондирующего луча на вершину зарубки возможно наблюдение углового эффекта, т. е. увеличения амплитуды принимаемого сигнала за счет отражения от отражателя и двугранного угла (рис. 7.1). Чем больше угол падения, тем больше угловой эффект в данном случае. Усиление сигнала за счет углового эффекта определяется с помощью коэффициента G . Зависимость коэффициента G от угла падения γ представлена на рис. 7.2. Угловой эффект нужно учитывать для больших значений γ . Модельные отражатели типа зарубок применяют для тонкостенных изделий. Коэффициент G учитывается при настройке чувствительности прибора.

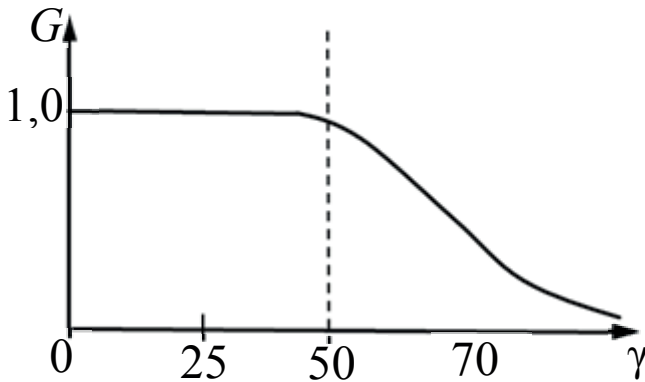


Рис. 7.2. Зависимость коэффициента G от угла падения γ

7.4. Стандартные образцы (СО)

Способы проверки параметров аппаратуры и характеристик метода контроля группируют в два класса задач. К первому относят проверку, выполняемую после выпуска аппаратуры, ее капитального ремонта и при промежуточной аттестации.

К задачам второго класса относят повседневную проверку аппаратуры, которая должна подтвердить ее работоспособность и установить значения характеристик, меняющихся во время эксплуатации. Такую

проверку осуществляют с помощью стандартных образцов (СО), не используя дополнительных приборов. Выделяют два типа стандартных образцов: государственные стандартные образцы СО и стандартные образцы предприятия СОП.

ГОСТ 14782–86 предусматривает комплект из четырех СО: СО-1, СО-2 и СО-2А; СО-3.

Стандартный образец СО-1 (рис. 7.3). Образец изготавливают из органического стекла с коэффициентом затухания 0,26–0,34 Нп/см на частоте 2,5 МГц. Для удобства работы он имеет металлическую стенку с оцифровкой.

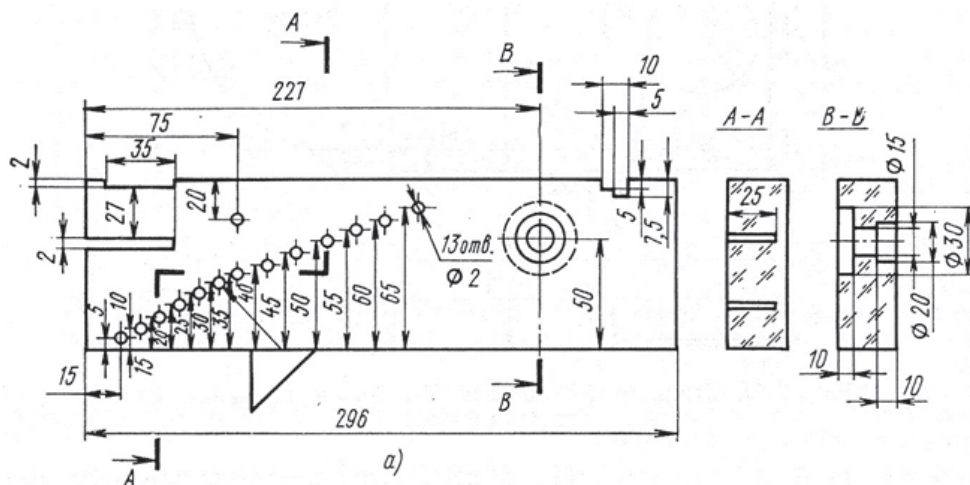


Рис. 7.3. Стандартный образец СО-1

С помощью СО-1 определяют лучевую разрешающую способность. В СО-1 предусмотрены отражатели в виде ступенчатого паза и фигурного отверстия, имеющего три разных диаметра. Ступенчатый паз используют при контроле прямым преобразователем. На экране должны наблюдаться три отдельных сигнала: донный, от ступенек глубиной 5 мм и 2,5 мм. При оценке разрешающей способности в изделии принимают во внимание разную скорость звука в оргстекле c_{Π} и материале изделия c . Величину Δr при известном размере ступеньки Δr_{Π} рассчитывают по формуле

$$\Delta r = \frac{c \cdot \Delta r_{\Pi}}{c_{\Pi}}.$$

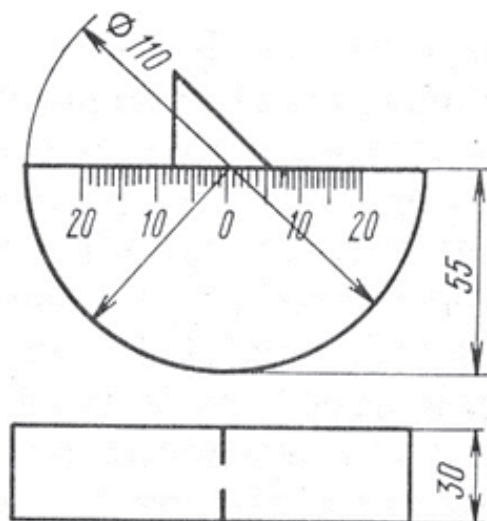


Рис. 7.5. Стандартный образец СО-3

Оценку точки ввода по СО-3 выполняют дважды при развороте преобразователя на 90^0 , чтобы проверить направление акустической оси в двух плоскостях.

Стандартные образцы предприятия (СОП). Стандартные образцы предприятия не нумеруются, к ним предъявляются следующие требования:

- 1) изготавливаются из материала, из которого выполнен контролируемый объект;
- 2) все акустические и физико-механические свойства такого образца совпадают с акустическими и физико-механическими свойствами контролируемого изделия;
- 3) в качестве отражателей используются различные модели реальных дефектов.

Физическая реализация некоторых моделей дефектов представляет большие технологические трудности. Поэтому при экспериментах и производственном контроле модели дефектов заменяют искусственными отражателями (рис. 7.6): диск — плоскодонным отверстием; сферу — отверстием со сферическим дном и т. д.

Искусственные отражатели, используемые в СОП, можно разделить на три группы: точечные, или непротяженные (сфера, небольшой диск и короткий цилиндр), протяженные в одном направлении

(бесконечный цилиндр и полоса), протяженные в двух направлениях (бесконечная плоскость).

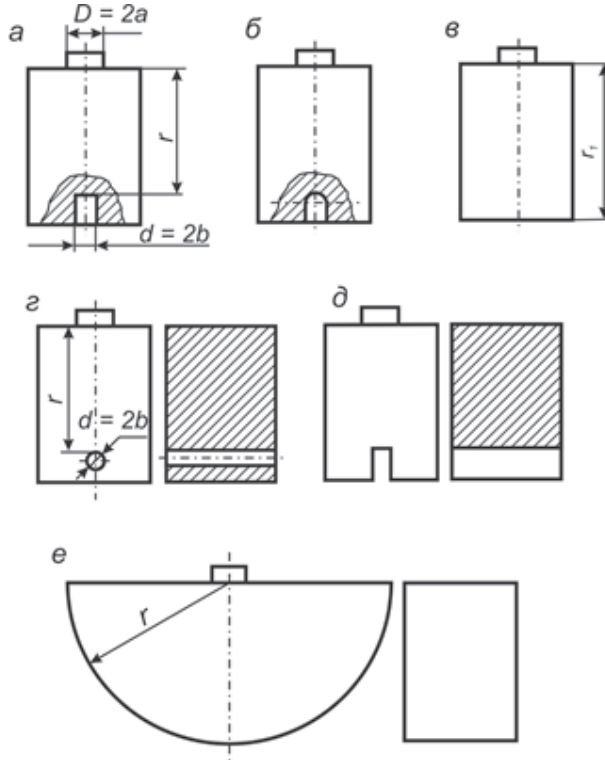


Рис. 7.6. Образцы для контроля прямыми преобразователями:

$a, б$ — отверстия с плоским и сферическим дном; $в$ — плоскость;
 $г$ — боковое цилиндрическое отверстие; $д$ — паз с плоским дном;
 $е$ — вогнутая цилиндрическая поверхность

Важной характеристикой СОП являются площадь и размер дефекта. Вводят понятие эквивалентного размера дефекта — размер такого искусственного отражателя, находящегося в СОП, которому можно поставить в соответствие некий реальный дефект такого же класса. По эквивалентному размеру дефект можно количественно оценить, определить степень опасности.

7.5. Эквивалентный размер дефекта

Амплитуду эхосигнала в ультразвуковой дефектоскопии определяют относительным методом, который заключается в сравнении эхосигнала от дефекта с каким-либо опорным сигналом, получен-

ным тем же преобразователем от отражателя известной величины и геометрической формы. Относительный метод позволяет отказаться от необходимости расчета коэффициентов преобразования электрической энергии в механическую. Размер дефекта в этом случае может быть выражен через некоторую стандартизированную величину, воспроизводимую при любых измерениях. В ультразвуковой дефектоскопии в качестве унифицированной единицы измерения используют эквивалентный размер (эквивалентную площадь) дефекта.

Эквивалентный размер дефекта — размер такого плоскодонного отражателя, который расположен в том же материале на идентичной глубине и дает такую же амплитуду эхосигнала, что и реальный дефект. Эквивалентный размер дефекта не равен реальному. Реальный размер, как правило, больше.

Коэффициент выявляемости дефектов определяется по формуле

$$K_{\text{выяв}} = \frac{S_{\text{экв}}}{S_{\text{реал}}}.$$

Применяют два способа измерения эквивалентной площади дефектов: с помощью испытательных образцов и по АРД-диаграммам. Первый способ состоит в том, что эхосигнал от дефекта последовательно сравнивается с сигналами от плоскодонных отверстий различной величины. Необходимо найти отверстие, эхосигнал от которого равен сигналу от дефекта.

Недостатком способа является необходимость изготовления большого числа образцов с широким набором плоскодонных отражателей по диаметру и глубине расположения.

7.6. АРД-диаграмма

Соотношение амплитуд отраженного от дефекта и зондирующего сигналов $\frac{A_d}{A_0}$ может быть представлено как функция параметров: расстояния от преобразователя до отражателя, отношения диаметра диска к диаметру преобразователя и величины ближней зоны.

Для оценки эквивалентного размера дефекта применяют так называемые АРД-диаграммы (амплитуда — расстояние — диаметр).

АРД-диаграммы бывают:

- обобщенными (безразмерные);
- рабочими (размерные).

На обобщенных диаграммах (рис. 7.7) по оси абсцисс отложено расстояние между ПЭП и отражателем, нормированное на размер ближней зоны излучателя. По оси ординат отложено ослабление в отрицательных децибелах.

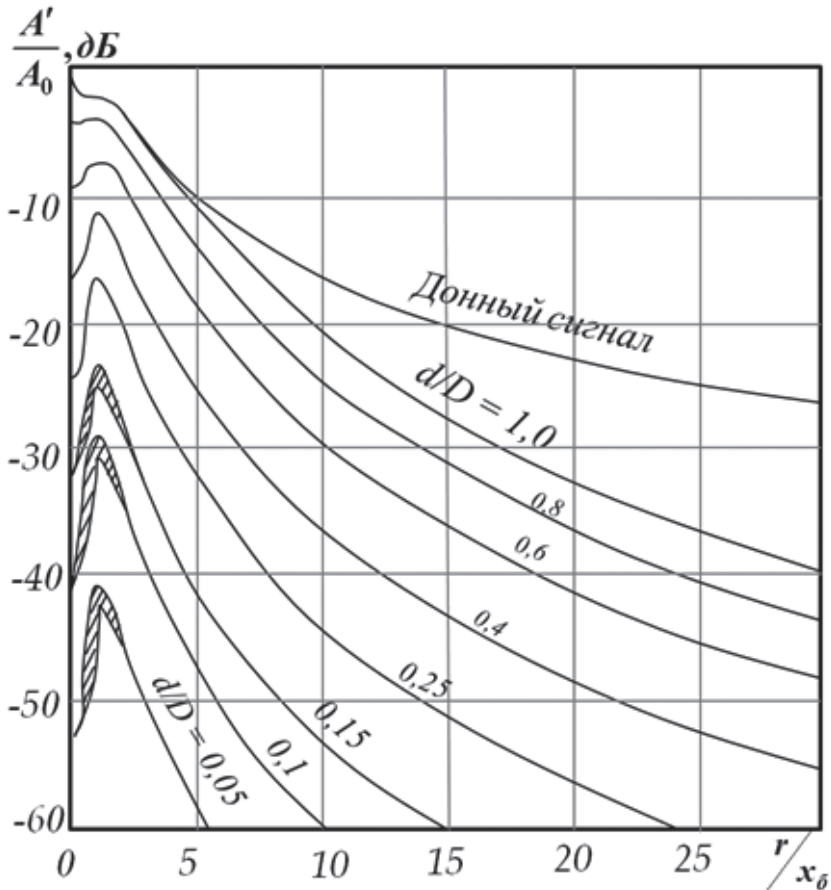


Рис. 7.7. Безразмерная АРД-диаграмма для эхометода:

r/x_0 — расстояние до дефекта, нормированное на величину ближней зоны;
 d/D — эквивалентный размер дефекта, нормированный на диаметр диска преобразователя

На поле АРД-диаграммы нанесена серия кривых, каждая из них соответствует своему диаметру (или площади) эквивалентного отражателя, отнесенному к диаметру (площади) пьезоэлемента. Самая верхняя кривая соответствует донному сигналу.

Рабочую АРД-диаграмму строят для конкретных параметров контроля: материала изделия, частоты упругих колебаний, радиуса преобразователя, угла ввода луча. В качестве основного сигнала A_0 можно использовать эхосигнал от бокового цилиндрического отражателя или отражение от бесконечной плоскости (донного сигнала).

Каждую обобщенную диаграмму можно перевести в рабочую.

Способы получения АРД-диаграмм следующие:

- 1) расчет по формулам акустического тракта;
- 2) экспериментальный способ — исследование образца, изготовленного из материала контролируемого объекта, с множеством отверстий, расположенных на различной глубине. Недостаток данного метода состоит в сложности изготовления такого образца.

В действующей нормативно-технической документации АРД-диаграммы приводятся в виде таблиц. В комплект дефектоскопов входят АРД-шкалы, которые представляют собой трафарет. Они позволяют быстро определять все необходимые параметры (глубина залегания, размер дефекта).

АРД-диаграммы могут использоваться для определения эквивалентных размеров и настройки чувствительности. АРД-диаграммы используются при контроле в дальней зоне. В ближней зоне диаграммы размываются. Измерение эквивалентных размеров становится неточным.

Контрольные вопросы

1. Какова основная задача акустического контроля?
2. Дайте определение акустического тракта. Какие эффекты определяют ослабление сигнала в акустическом тракте?
3. Какие модели дефектов используются при расчете акустического тракта? Какие искусственные дефекты они моделируют?
4. Что такое эквивалентный размер дефекта и как он связан с реальным размером?

5. Чему равен коэффициент выявляемости дефекта? Запишите выражение, поясните все обозначения.
6. Чем отличаются искусственные дефекты для наклонного преобразователя?
7. Для чего используются стандартные образцы? Какие СО вы знаете?
8. Какие требования предъявляются к стандартным образцам предприятия?
9. Что такое АРД-диаграмма? Назовите основные типы АРД-диаграмм.

8. АППАРАТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

8.1. Ультразвуковой дефектоскоп

Ультразвуковой дефектоскоп предназначен для генерации импульсов акустических колебаний, приема отраженных сигналов, а также преобразования этих сигналов в вид, удобный для наблюдения на экране, и для измерения координат дефектов и сравнения амплитуд сигналов. В состав прибора входит электронный блок (собственно дефектоскоп), набор преобразователей для излучения и приема ультразвуковых колебаний и различные вспомогательные устройства.

Для достоверного контроля дефектоскоп должен обеспечивать:

- линейную зависимость между амплитудами эхосигнала на входе дефектоскопа и индикаторе;
- получение максимальной информации о дефекте, точное измерение амплитуды и временных интервалов между зондирующим импульсом и эхосигналом от дефекта;
- большой динамический диапазон усилителя, что позволяет одновременно видеть на экране большие и малые эхосигналы;
- селекцию эхосигналов в любом заданном временном интервале и автоматическую сигнализацию (звуковую, световую) их наличия;
- выравнивание чувствительности дефектоскопа по всей зоне контроля для компенсации затухания ультразвука в металле.

Ультразвуковой дефектоскоп предназначен для излучения УЗ-колебаний, приема акустических сигналов, установления размеров выявленных дефектов и определения их координат.

Контроль качества продукции производят в различных условиях: в цехе, на монтаже, при эксплуатации. Поэтому к таким характеристикам дефектоскопа, как масса, габариты, автономность питания, простота индикации дефектов, устойчивость к сотрясениям и вибрациям (ГОСТ 23049–84), предъявляются особые требования. Однако для обнаружения дефектов и правильной оценки их величины и степени допустимости для данного изделия дефектоскоп должен иметь обязательный минимум функциональных блоков, позволяющий выполнить необходимые операции.

Структурная схема дефектоскопа. Электрические схемы ультразвуковых дефектоскопов очень сложны и громоздки. Схема дефектоскопа и рекомендации по работе с ним обычно даны в заводской инструкции. Для изучения принципа работы дефектоскопа достаточно рассмотрения его структурной схемы (рис. 8.1).

Генератор зондирующих радиоимпульсов 7 вырабатывает импульс электрических колебаний, возбуждающий ультразвуковые колебания в преобразователе 3. Отраженные от дефекта УЗ-сигналы принимает тот же (совмещенная схема) или другой (раздельная схема) преобразователь и трансформирует их в электрические импульсы, которые поступают на вход усилителя 1. Коэффициент усиления его регулируется во времени с помощью системы 4 временной регулировки чувствительности (ВРЧ).

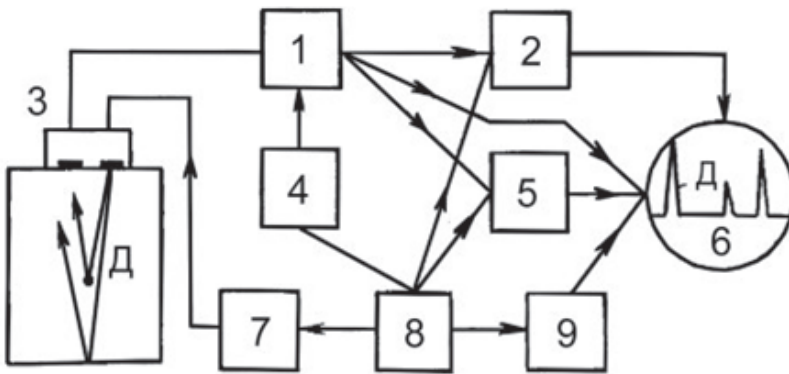


Рис. 8.1. Блок-схема импульсного дефектоскопа:

- 1 — усилитель; 2 — автоматический сигнализатор дефектов; 3 — преобразователь;
4 — система ВРЧ; 5 — блок измерения толщины; 6 — электронно-лучевой
индикатор; 7 — генератор зондирующих импульсов; 8 — синхронизатор;
9 — генератор развертки электронно-лучевого индикатора

Усиленный до требуемого значения сигнал поступает на вход электронно-лучевого индикатора 6 и автоматического сигнализатора дефектов (АСД) 2.

Синхронизатор 8 обеспечивает требуемую временную последовательность работы всех узлов дефектоскопа, одновременно с запуском генератора импульсов (или с некоторой заданной задержкой) он приводит в действие генератор развертки 9 электронно-лучевого индикатора.

Развертка позволяет различать по времени прихода сигналы от объектов отражения, расположенных на разном расстоянии от преобразователя, например сигналы от дефектов отличать от донного сигнала. Синхронизатор также управляет работой блоков ВРЧ и АСД.

Современные дефектоскопы снабжены устройствами для измерения амплитуды и времени прихода отраженного сигнала.

Как правило, дефектоскопы общего назначения снабжены дублированной системой питания: от сети и от аккумуляторной батареи. Дефектоскоп имеет выход для работы других измерительных приборов и может быть синхронизирован с внешним источником.

В последнее время разработаны микропроцессорные дефектоскопы, автоматизирующие измерительные операции и обработку информации. Вспомогательные комплектующие дефектоскопа призваны облегчить труд оператора и повысить достоверность контроля. К ним относятся магнитные держатели, обеспечивающие надежный акустический контакт с изделием, приспособления для симметричного одновременного перемещения преобразователя для контроля по схеме тандема и др.

Рассмотрим более подробно работу основных узлов импульсного дефектоскопа.

Генератор зондирующих импульсов. Основными элементами генератора зондирующих импульсов (ГЗИ) являются колебательный контур, включающий передающий пьезоэлемент, и электронная схема, обеспечивающая генерацию коротких импульсов той или иной формы, заполненных радиочастотными колебаниями.

Наибольшее распространение получили так называемые генераторы ударного возбуждения. Схема простейшего генератора такого типа приведена на рис. 8.2.

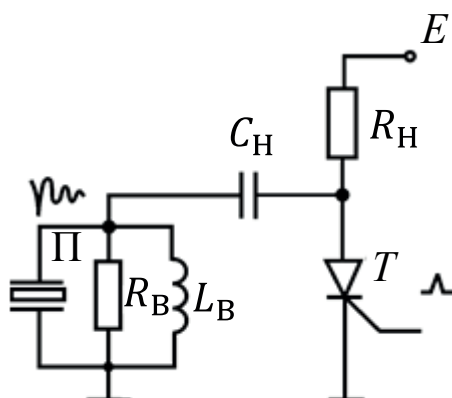


Рис. 8.2. Схема генератора зондирующих импульсов

Колебательный контур включает пьезоэлементы Π , индуктивность $L_{\text{в}}$ и шунтирующее сопротивление $R_{\text{в}}$. Подбором индуктивности $L_{\text{в}}$ обеспечивают требуемую частоту заполнения генерируемого импульса, а регулировка $R_{\text{в}}$ обеспечивает необходимую добротность контура. Накопительная емкость $C_{\text{н}}$ разряжается через тиристор T при подаче на его электрод пускового импульса $V_{\text{зап}}$.

Амплитуда генерируемого импульса зависит от напряжения, а также от постоянной времени зарядной цепи, определяемой балластным сопротивлением $R_{\text{н}}$, и от накопительной емкости $C_{\text{н}}$.

Существенным недостатком генератора ударного возбуждения является несоответствие очень высокой частоты первого полупериода колебаний (собственно удара) основной частоте требуемых ультразвуковых колебаний. Это вызывает снижение коэффициента полезного действия и расширение спектра частот. Поэтому в некоторых дефектоскопах используют схемы получения зондирующих импульсов произвольной формы, например, колоколообразной, которая характеризуется наиболее узким спектральным составом при заданной длительности.

Приемно-усилительный тракт. Приемно-усилительный тракт дефектоскопа содержит предусилитель, измеритель амплитуд сигналов (аттенюатор), усилитель радиочастоты, детектор и выходной усилитель.

Предусилитель обеспечивает согласование усилительного тракта с приемным преобразователем. Он содержит ограничитель амплитуды

ды, который предохраняет усилитель от перегрузок, связанных с воздействием зондирующего импульса (когда преобразователь включен по совмещенной схеме). При этом сигналы небольшой амплитуды практически не искажаются.

Схема, показанная на рис. 8.3, основана на том, что сопротивление кремниевого диода резко уменьшается, когда напряжение на нем, действующее в прямом направлении, превосходит примерно 0,5 В. При показанном включении ограничительные элементы (диоды) шунтируют как положительный, так и отрицательный полупериоды зондирующего импульса.

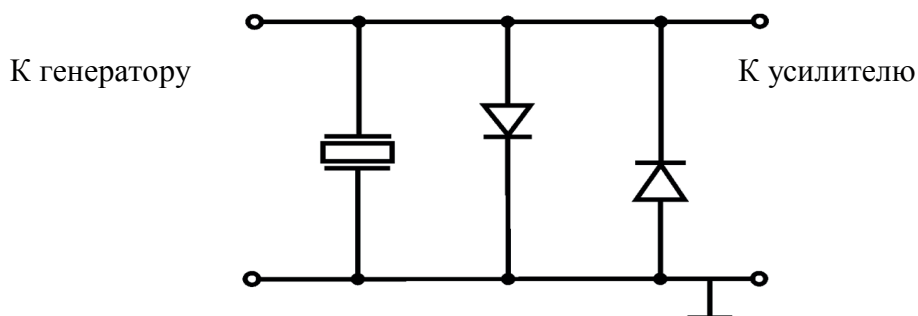


Рис. 8.3. Схема подавления воздействия зондирующего импульса

Недостатком этой схемы является то, что шунтирование искажает принимаемые сигналы большой амплитуды. Такой недостаток можно исправить, вводя цепочку из нескольких последовательно включенных диодов.

Входное сопротивление предусилителя должно быть согласовано с выходным сопротивлением преобразователя с учетом подключенного к нему колебательного контура. Для достижения максимальной чувствительности их импедансы должны быть примерно равны. Оценки показывают, что при настройке контура в резонанс с пьезопластинной активное сопротивление преобразователя составляет 20–60 Ом в зависимости от частоты и акустической нагрузки. В этих условиях сопротивление на входе усилителя не должно превышать 50–100 Ом.

Амплитуды сигналов чаще всего измеряют с помощью калиброванного делителя напряжения — аттенюатора. При этом сравнивают амплитуды двух или нескольких сигналов в относительных единицах. За единицу (0 дБ) обычно принимают максимальный сигнал, соответ-

ствующий амплитуде акустического зондирующего импульса. Однако иногда за исходное значение принимают амплитуды других сигналов, например донного сигнала, для контролируемого изделия.

Аттенюатор располагают вблизи входа приемно-усилительного тракта для того, чтобы искажение амплитуд поступивших сигналов было минимальным. Требуемый диапазон измерения 60–80 дБ. В настоящее время выпускаются автоматические измерители амплитуды с цифровым выходом.

В дефектоскопах применяют усилители радиочастоты двух типов: узкополосные и широкополосные.

Узкополосные усилители находят широкое применение. Они обладают высокой помехоустойчивостью. Полосу пропускания выбирают не менее $0,2f_0$ (f_0 — резонансная частота), что обеспечивает минимальные искажения принятых сигналов в приемном тракте. Коэффициент усиления узкополосных схем в современных дефектоскопах достигает 80–90 дБ. Поскольку сигнал для дальнейшей обработки должен иметь амплитуду около 1 В, минимальное значение сигнала на входе усилителя должно быть не менее 10^{-4} В. Как правило, применяют дифференциальные ступени усиления, обеспечивающие широкий динамический диапазон и высокую стабильность коэффициента усиления. Недостатком узкополосных усилителей является необходимость перестройки частотного диапазона при изменении рабочей частоты прибора.

В некоторых случаях целесообразно использовать широкополосные усилители, хотя они более сложны и обладают худшей помехоустойчивостью.

Усиленные радиочастотные сигналы поступают к детектору, на нагрузку которого выделяются огибающие радиоимпульсов.

Детектированные сигналы поступают на выходной усилитель с коэффициентом усиления 20–30 дБ. В некоторых дефектоскопах предусмотрена возможность наблюдения на электронно-лучевом индикаторе недетектированных сигналов с радиочастотным заполнением.

Важной характеристикой усилителя является его динамический диапазон, т. е. отношение амплитуд максимального и минимального сигналов, усиливаемых без искажения. Приборы с большим динамическим диапазоном позволяют правильно оценить соотношение амплитуд сигналов на экране электронно-лучевого индикатора даже без применения аттенюатора.

Помимо калиброванного аттенюатора, импульсные дефектоскопы имеют другие регуляторы чувствительности. К ним относят регуляторы амплитуды зондирующего импульса, ВРЧ и отсежки, а также некалиброванный регулятор чувствительности усилителя. Регулятор отсежки изменяет потенциал порогового уровня отпирания детектора. Благодаря этому отсекаются все импульсы, амплитуда которых меньше выбранного значения. Применение отсежки искажает реальное соотношение амплитуд детектированных сигналов и сужает динамический диапазон усилителя прибора. В связи с этим разработана система так называемой компенсированной отсежки, которая обеспечивает восстановление амплитуды отсеженного сигнала до первоначального значения. Очевидно, что подобная схема позволяет оценить амплитуды отраженных сигналов по экрану электронно-лучевого индикатора даже при включении отсежки.

Временная регулировка чувствительности. Система временной регулировки чувствительности (ВРЧ) предназначена для генерирования электрического сигнала определенной формы, с помощью которого изменяется во времени усиление одной или нескольких ступеней приемно-усилительного тракта. Вызвано это, как уже указывалось, необходимостью компенсировать ослабление ультразвука в контролируемом изделии, обусловленное дифракционным расхождением и затуханием. Исходя из этого закон изменения усиления должен быть обратным закону убывания амплитуд отраженных сигналов от одинаковых по размерам дефектов по мере их удаления от преобразователя.

В наиболее совершенных приборах сигнал системы ВРЧ, учитывающий дифракционное расхождение ультразвука, подбирают кнопочным переключателем. Сигнал соответствует типу используемого преобразователя (зависит от размеров преобразователя, его частоты), а также длительности начального участка, на котором управляющий сигнал сохраняется постоянным, в соответствии с длиной ближней зоны преобразователя.

Действие затухания компенсируют другим управляющим сигналом ВРЧ или поворотом линии развертки в приборах с логарифмическим усилителем.

В некоторых приборах форму управляющего сигнала систем ВРЧ подбирают эмпирически по образцам с искусственными отражателями. В этом случае предусматривают отдельную регулировку по величине начального, среднего и конечного участков регулирующего сигнала.

Регистратор. В подавляющем числе эхоимпульсных дефектоскопов принятые отраженные сигналы регистрируются электронно-лучевыми индикаторами. Чаще всего на горизонтально отклоняющие пластины подается усиленный до необходимого значения полезный сигнал, а на вертикально отклоняющие— напряжение развертки. Развертка синхронизируется частотой зондирующих посылок.

Электронно-лучевой индикатор содержит электронно-лучевую трубку (ЭЛТ), согласующие и видеоусилительные ступени, а также генератор развертки (обычно ждущего типа), запускаемый от синхронизатора дефектоскопа одновременно с генератором зондирующих импульсов.

Длительность развертки t_p определяется по скорости звука в материале C и толщине контролируемых изделий H_{\max} :

$$t_p = 2H_{\max} / C .$$

При большой толщине изделия сигналы от близкорасположенных дефектов (особенно вблизи зондирующего импульса) плохо различимы на линии развертки. С целью преодолеть указанный недостаток в современных дефектоскопах весь диапазон толщин прозвучиваемых изделий разбивают на ряд поддиапазонов, один из которых и выбирают при контроле изделия соответствующих габаритов.

Кроме того, многие дефектоскопы имеют специальные схемы задержки, с помощью которых запуск развертки осуществляется не зондирующим импульсом, а, например, первым отраженным от поверхности сигналом при иммерсионном контроле. Некоторые дефектоскопы снабжены специальной системой с произвольно регулируемым временем задержки, что обеспечивает возможность более детального изучения любого выбранного участка развертки.

В отдельных дефектоскопах, кроме развертки типа *A*, при которой сигнал от дефекта на экране отображается в виде импульса, амплитуда которого пропорциональна величине дефекта, а положение на линии развертки пропорционально расстоянию от дефекта, применяются развертки типа *B* и *C*. Развертка типа *B* отображает поперечное сечение объекта контроля. Эхосигнал индуцируется простой отметкой, амплитуда сигнала не измеряется. Развертка *C* отображает продольное сечение объекта также с яркостной отметкой сигнала.

Во многих автоматизированных дефектоскопических установках в качестве регистраторов применяют (наряду с электронно-лучевыми

индикаторами) различные электромеханические системы — самописцы того или иного типа. Достоинством применения самописцев является возможность получения документа — дефектограммы, фиксирующей результаты контроля.

Система автоматической сигнализации дефектов. Система автоматической сигнализации дефектов (АСД) предназначена для автоматической фиксации момента обнаружения дефекта. Ее можно рассматривать как частный случай регистратора. Особое значение такая система имеет в автоматизированных промышленных установках, однако и при ручном контроле эта система значительно облегчает работу оператора и позволяет повысить надежность полученных результатов прозвучивания.

Система АСД содержит стробирующее устройство и схему индикации выявленных дефектов. Стробирующее устройство предназначено для генерации вспомогательных импульсов, ширина и местоположение которых определяют зону индикации принятых отраженных сигналов. Указанные вспомогательные импульсы подаются к каскаду совпадений, на второй вход которого поступают все отраженные сигналы с выхода приемно-усилительного тракта.

Изменяя ширину и положения стробирующего импульса, можно произвольно выбирать тот или иной участок развертки, в котором наблюдаются отраженные сигналы.

Стробирующее устройство, таким образом, позволяет решать несколько задач.

Во-первых, располагая начало стробирующего импульса после зондирующего или начального сигнала, а конец — перед донным сигналом, можно отсечь эти сигналы от последующих схем индикации.

Во-вторых, правильно выбирая длительность и время начала стробирующего импульса, можно установить требуемую зону контроля.

В-третьих, установив стробирующий импульс так, чтобы в него попал только донный сигнал, можно по амплитуде этого сигнала следить за стабильностью акустического контакта, общей исправностью работы аппаратуры, а также автоматически подстраивать чувствительность.

Наконец, применение стробирующего устройства позволяет повысить общую помехоустойчивость дефектоскопа, поскольку импульсные помехи любого типа могут воздействовать на индикатор лишь во время действия стробирующего импульса, которые всегда меньше общего периода зондирующих посылок.

В качестве индикаторов в системах АСД обычно применяют электрические лампы либо светодиоды, а также электромагнитные реле.

Синхронизатор. Синхронизатор представляет собой автоколебательную систему, выполненную по схеме мультивибратора или (реже) блокинг-генератора.

Частоту генерируемого синхронизатором напряжения выбирают в зависимости от задач контроля в пределах 50–8000 Гц. В некоторых дефектоскопах она регулируется.

Поскольку частота синхронизатора определяет период следования зондирующих посылок, ее желательно выбирать большей. Это обеспечивает увеличение скорости контроля, а следовательно, его производительности.

Однако частота ограничивается затуханием ультразвука и толщиной контролируемых изделий, поскольку необходимо, чтобы ультразвуковой импульс, излученный в изделие, полностью затух до поступления следующей посылки. Ориентировочно можно считать, что достаточный уровень ослабления будет достигнут в результате не менее чем N -кратного прохождения ультразвука через изделие по толщине, где $N = 4 \dots 12$. В этом случае максимальная частота следования зондирующих импульсов $f_{\text{зи}} = \frac{1}{T_{\text{зи}}} = \frac{C}{N \cdot 2H_{\text{max}}}$.

Устройство для измерения расстояния до объекта отражения. Расстояние до дефекта, дна изделия или другого отражателя ультразвуковых импульсов определяют по времени пробега импульса. При этом скорость распространения ультразвука в материале учитывают и корректируют путем измерения какого-либо известного расстояния, например толщины контролируемого изделия.

Во многих дефектоскопах измерения осуществляют непосредственно по экрану электронно-лучевого индикатора, снабженного шкалой. Расстояния также определяют путем совмещения с передним фронтом измеряемого эхосигнала вспомогательного импульса, вырабатываемого измерительным устройством — глубиномером. Измерительный элемент (сопротивление или емкость) этого устройства, изменение которого вызывает перемещение метки вдоль линии развертки, имеет шкалу. В случае применения наклонных преобразователей используют две шкалы, соответствующие двум координатам дефектов. В некоторых приборах шкала одна, а две координаты измеряют ступенчатым переключателем регуляторов скорости ультразвука: одному положе-

нию переключателя соответствует измерение расстояния вдоль поверхности, а другому — по глубине изделия.

В современных импульсных толщиномерах и дефектоскопах применяют системы, дающие цифровой отсчет расстояний в изделии. При этом измеряется интервал времени между зондирующим и ближайшим к нему импульсом на экране или импульсом, перед которым устанавливается электронная метка. Такую систему отсчета следует признать наиболее удобной.

Во многих автоматизированных промышленных дефектоскопических установках, содержащих большое число преобразователей, последние включают поочередно либо отдельными группами. В этом случае синхронизатор управляет работой электронного коммутатора, логические элементы на выходе которого выполняют функции отдельных электронно-акустических каналов системы в заданной последовательности. Обычно применяют коммутаторы кольцевого или регистрового типа.

8.2. Шумы и помехи при ультразвуковом контроле

Помеха — некое возмущение, которое мешает приему полезного сигнала.

Шумы — это беспорядочные непериодические по времени прихода сигналы, а также сигналы, имеющие случайные значения параметров.

Внешние шумы. Внешние шумы имеют электрическую или акустическую природу и проявляются в виде импульсов на экране дефектоскопа. Электрические шумы возникают при включении и выключении мощных электрических аппаратов, работе сварочной аппаратуры. Акустические шумы вызываются ударами по объекту контроля.

Влияние электрических шумов ослабляется экранированием корпуса дефектоскопа, кабелей и преобразователей, заземлением. Экранирование импульсов помех, поступающих по сети питания, осуществляется фильтром верхних частот, вводимым в схему блока питания.

Электрические внешние импульсные шумы поступают в случайные моменты времени и представляют опасность для автоматизированных систем контроля, вызывая ложное срабатывание сигнализатора дефектов.

Помехи приемника дефектоскопа (внутренние). Внутренние помехи связаны с собственными шумами акустического тракта.

Уровень помех ограничивает значение коэффициента усиления и предельную чувствительность.

Способы борьбы с внутренними помехами:

- применение специальных схемотехнических решений;
- увеличение чувствительности за счет увеличения амплитуды зондирующих импульсов;
- увеличение коэффициента преобразования преобразователя;
- использование узкополосных усилителей ВЧ.

Одним из видов внутренних шумов являются шумы преобразователя. Они возникают за счет многократного отражения зондирующего импульса в пьезопластине, протекторе.

К основным способам борьбы с внутренними шумами относят:

- подбор специального материала протектора, демпфера, ПЭП и типа контактной жидкости;
- использование особых размеров и формы демпфера, протектора.

Ложные сигналы. К ложным сигналам относят сигналы в зоне контроля, обусловленные отражениями ультразвука от элементов конструкции изделия. Ложный сигнал может быть принят за отражение от дефекта; он может наложиться на сигнал от дефекта и исказить его характеристики. Для исключения влияния ложных сигналов применяют тщательный выбор участка стробирования развертки, а также амплитудную дискриминацию, т.е. отсечку сигналов ниже определенного уровня.

Структурные помехи. Рассеяние ультразвука на структурных неоднородностях, зернах материала приводит к структурным помехам. Многочисленные импульсы, образовавшиеся в результате рассеяния ультразвука на неоднородностях, приходят к приемному преобразователю с различными временами задержки и разной фазой. Вследствие случайного соотношения фаз колебаний помехи имеют вид четких импульсов. Иногда структурные помехи превышают уровень донного сигнала, исключая возможность применения зеркально-теневого метода.

Особенность заключается в виде помех, которые называют травой, наличии очень большого числа импульсов на всей линии развертки.

При сканировании малые смещения ПЭП в пределах 1–2 мм почти не влияют на амплитуду сигнала от дефекта. В то же время детальная структура импульсов структурных помех радикально изменяется. Это дает возможность опытному оператору обнаруживать дефекты, импульсы от которых сравнимы с уровнем структурных помех.

Структурные помехи — это постоянно действующий фактор. Он существенно ограничивает чувствительность контроля.

Известно два метода повышения чувствительности при сильном влиянии структурных помех. Первый заключается в оптимальном выборе параметров контроля, а второй — в применении методов обработки сигналов. Для надежного обнаружения амплитуда полезного сигнала должна быть в 3–5 раз выше среднего уровня помех. Можно рекомендовать следующие меры, повышающие отношение сигнал — шум. К ним относятся применение фокусирующих преобразователей с узкой диаграммой направленности, т. к. эта мера уменьшает объем материала, являющегося источником помех. Если контроль производится в дальней зоне, то направленность улучшается при увеличении диаметра пьезопластины. В некоторой степени к снижению помех приводит уменьшение длительности зондирующего импульса.

8.3. Причины возникновения и способы подавления ложных сигналов

Трансформация волн. Преобразования типа волны возникают при отражении от поверхностей, наблюдаются при углах отражения, близких к критическим. Рассмотрим трансформацию волн на примере (рис. 8.4).

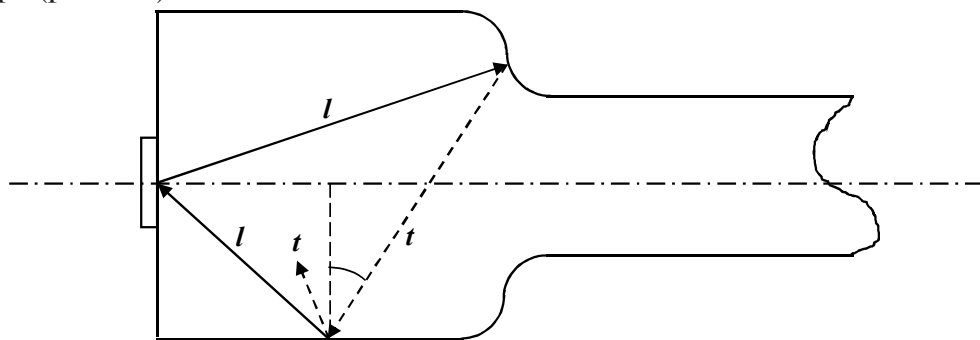


Рис. 8.4. Трансформация продольной волны в оси

Контроль изделия производится с торца. Продольная волна l , отражаясь, трансформируется в поперечную t , которая далее вновь трансформируется в продольную и попадает на ПЭП. В итоге на экране можно получить целый набор сигналов. Это существенно усложняет процедуру контроля. Если угол α больше третьего

критического угла, то ложных сигналов не будет, т. к. трансформации не происходит.

Изделия достаточно большой протяженности лучше контролировать не продольными, а поперечными волнами. Поперечные волны вводят в ОК бесконтактным способом или путем приклеивания пьезопластины к изделию.

Незеркальное отражение. Рассмотрим на примере контроля углового изделия наклонным преобразователем незеркальное отражение (рис. 8.5). В результате дифракционного рассеяния на двугранном угле образуется набор краевых волн. Чем острее угол отражения, тем больше интенсивность краевых волн.

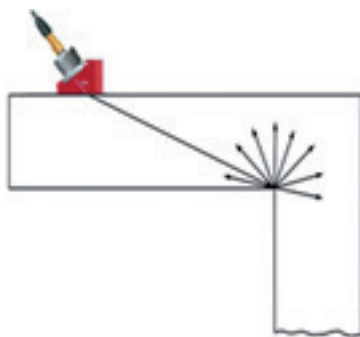


Рис. 8.5. Появление краевых волн на двугранном угле

Локальные напряженные зоны. Рассмотрим вал, на который с натягом насажена втулка, (рис. 8.6).

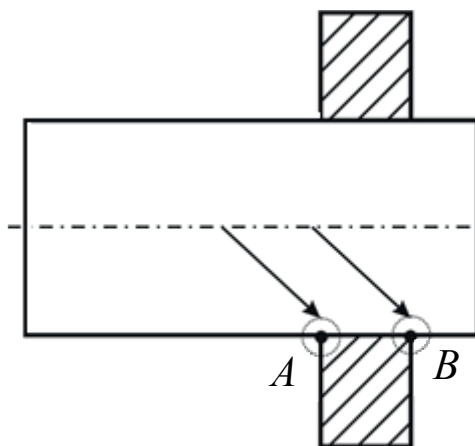


Рис. 8.6. Локальные напряженные зоны на примере вала с втулкой

При падении волн на локально деформированные напряженные зоны *A* и *B* возникает эхосигнал, т. к. изменение акустических свойств эквивалентно наличию дефекта.

Вогнутые и выпуклые поверхности цилиндрического типа.

Распространение волн при рассеянии на *вогнутой поверхности* показано на рис. 8.7. Контроль производится прямым ПЭП (продольными волнами). Луч *1* падает под углом 90° к касательной к вогнутой поверхности, луч *2* — под углом α , а луч *3* под углом бóльшим, чем α . В результате двойного отражения будут возникать дополнительные сигналы (от лучей *2* и *3*).

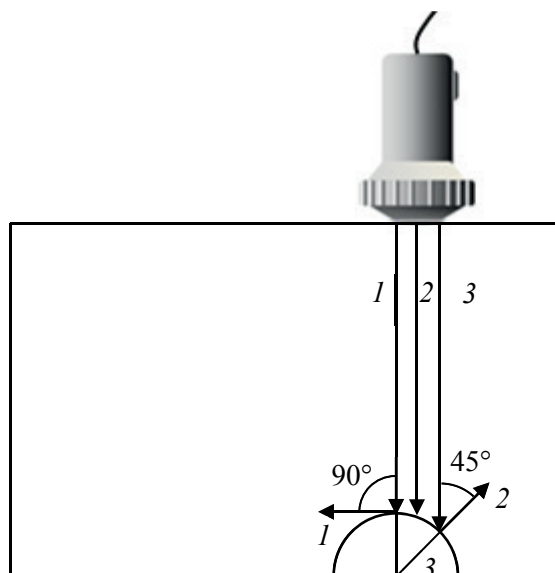


Рис. 8.7. Контроль цилиндрической вогнутой поверхности

При угле падения $\alpha = 45^\circ$ луч *2* будет давать мощный отраженный сигнал. Для луча *3* угол, при котором будет наблюдаться мощный отраженный сигнал, равен 61° . На линии развертки сигнал *1* будет ближе всего, затем будут идти сигналы *2* и *3*.

Рассмотрим случай контроля *выпуклой поверхности* цилиндрического стержня продольными волнами с помощью прямого ПЭП (рис. 8.8). Сигнал от преобразователя распространяется не только по прямой, но и под некоторым углом γ , отражается два раза от внутренней по-

верхности стержня, трансформируется при этом в поперечную волну t , затем повторно отражается с трансформацией в продольную волну и попадает обратно на ПЭП.

Ложный сигнал будет возникать на линии развертки на эквивалентном расстоянии $1,3d$, т. е. время прихода импульса будет совпадать со временем регистрации сигнала, отразившегося от перпендикулярной плоскости на расстоянии $1,3d$. Если волна претерпевает трансформацию из продольной в поперечную и затем снова в продольную, то ложный сигнал будет наблюдаться на эквивалентном расстоянии $1,67d$. Оба ложных сигнала будут на развертке дальше донного сигнала. Причем амплитуда ложных сигналов бывает больше амплитуды донного, и их можно принять за донный сигнал.

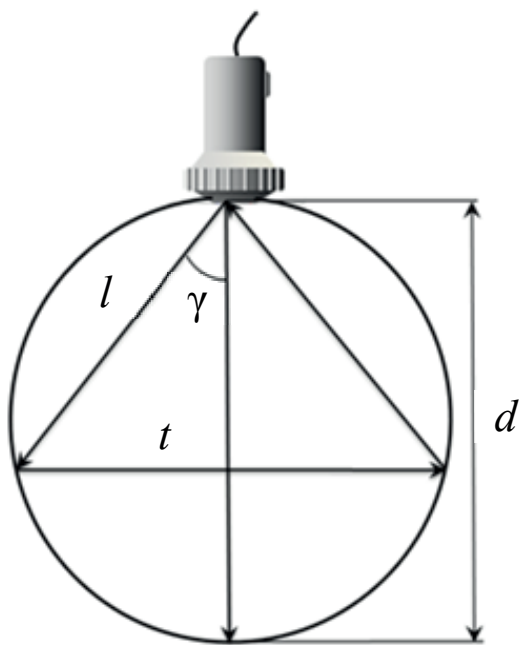


Рис. 8.8. Контроль выпуклой поверхности

Интерференция. В том случае, когда контроль ведут прямым преобразователем вблизи края изделия, за счет расходимости луча зондирующий сигнал попадет на двугранный угол, отклонившись на расстояние d (рис. 8.9). Изделие имеет толщину l .

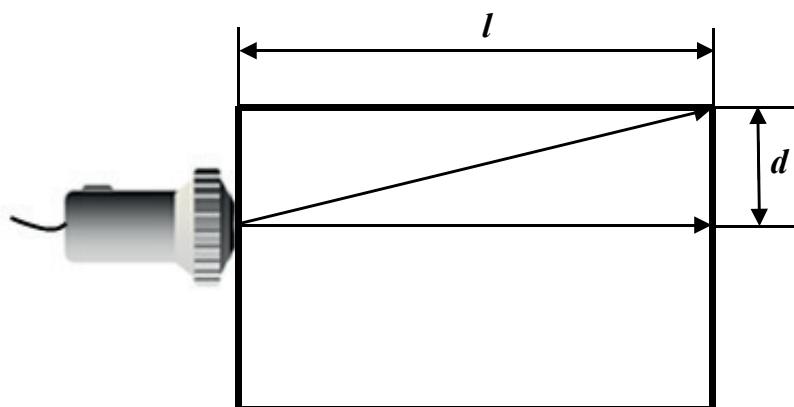


Рис. 8.9. Возникновение ложного сигнала при падении зондирующего луча на двугранный угол

Сигнал будет усиливаться в результате интерференции, если разность хода Δ меньше длительности импульса $\tau_{\text{имп}}$

$$\Delta < \tau_{\text{имп}}.$$

Условие отсутствия интерференции

$$\frac{2(\sqrt{l^2 + d^2} - l)}{C_l} < \tau_{\text{имп}},$$

где C_l — скорость продольной волны.

В этом случае сигнал не будет усиливаться.

На рис. 8.10 изображен объект контроля с отверстием, отверстие находится на расстоянии l от ПЭП и на расстоянии h от края изделия.

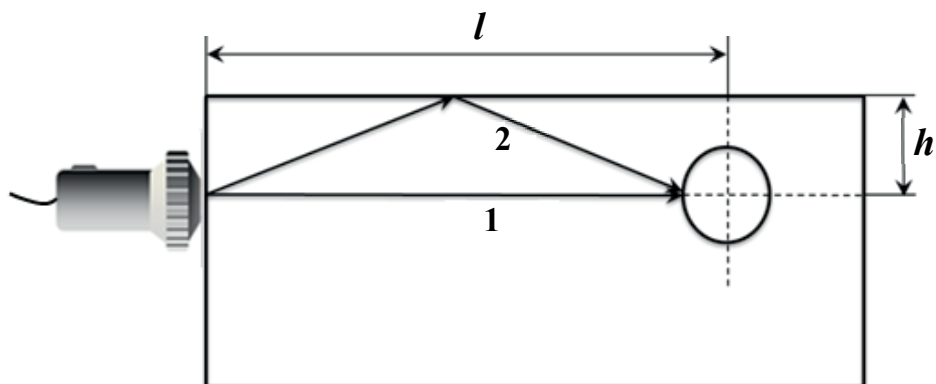


Рис. 8.10. Возникновение ложного сигнала при падении зондирующего луча на цилиндрическое отверстие

Рассмотрим два зондирующих луча. Один падает прямо на отверстие, а другой отражается от края изделия и также попадает на отверстие. Будут возникать интерференционные эффекты, дающие ложный сигнал. Условие отсутствия интерференции

$$h > 1.4\sqrt{l\lambda_l}.$$

Игнорирование интерференционных явлений приводит к неправильным результатам, и может оказаться, что при проведении УЗ-контроля амплитуда эхосигнала немонотонно убывает с расстоянием.

Возникновение поверхностных волн. При проведении контроля РС-преобразователями боковой лепесток излучающей диаграммы может дать ложный сигнал в приемном преобразователе (рис. 8.11). Возможно также отражение от края изделия сигналов от боковых лепестков.

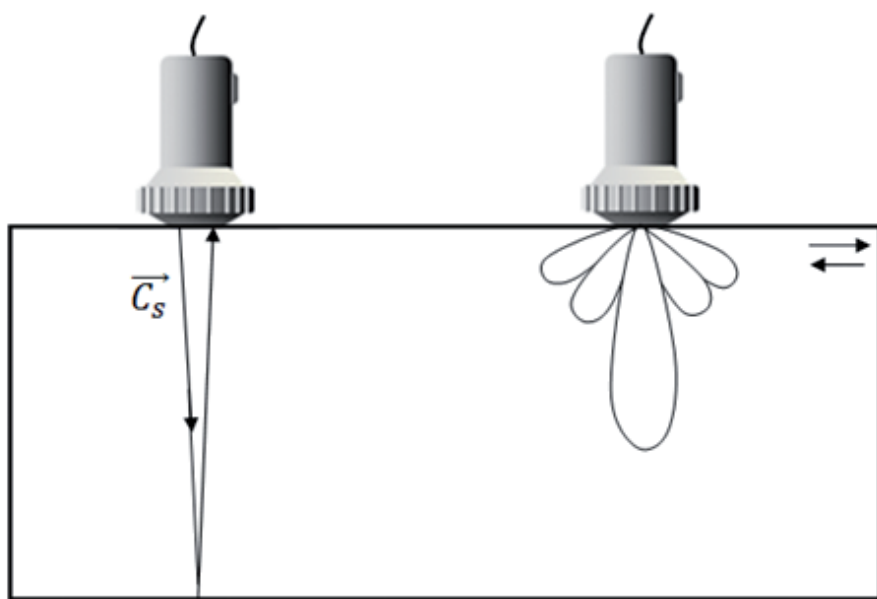


Рис. 8.11. Возникновение ложного сигнала из-за возникновения боковых лепестков диаграммы направленности

Существует два способа выделения ложных сигналов:

1) изменение амплитуды ложного сигнала за счет демпфирования. Этот способ лучше всего подходит для рэлеевских волн;

2) аппаратный способ. Применяется тогда, когда нет доступа к проблемным участкам. Его эффективность (выявляемость) зависит от разрешающей способности дефектоскопа.

8.4. Процедура контроля

Оптимизированная технология акустического контроля должна обеспечивать обнаружение и идентификацию всех недопустимых дефектов. Такая технология разрабатывается на основе существующего опыта дефектоскопии продукции конкретного вида, статистики распределения дефектов по типам, размерам и расположению, а также существующих нормативов оценки качества. Основными этапами выбора технологии контроля являются:

- 1) оценка дефектоскопичности объекта;
- 2) выбор метода и аппаратуры контроля конкретного изделия или элемента;
- 3) регламентация основных параметров контроля;
- 4) организация и последовательность проведения операций контроля;
- 5) алгоритм оценки качества по результатам контроля.

Главными условиями дефектоскопичности объекта контроля являются: низкий коэффициент затухания ультразвука и высокое соотношение полезный сигнал — шум в основном материале.

Поиск дефектов производится путем продольно-поперечного сканирования (перемещения) преобразователя по всей зоне контроля сначала с одной, а затем с другой стороны. Шаг сканирования преобразователя должен быть не более половины диаметра пьезоэлемента. В процессе перемещения наклонный преобразователь необходимо непрерывно поворачивать вокруг вертикальной оси на $(\pm 15)^\circ$ для того, чтобы обнаружить различно ориентированные дефекты.

Для компенсации флуктуации акустического контакта чувствительность дефектоскопа в режиме поиска должна быть увеличена на 6 дБ. При появлении эхосигналов на рабочем участке развертки чувствительность снижается до уровня предельной (контрольной) чувствительности, установленной при эталонировании. Если эхосигнал превышает этот уровень, то измеряются характеристики дефекта: координаты, амплитуда эхосигнала, условная высота, условная протяженность и условное минимальное расстояние между дефектами. Все

указанные характеристики определяются на уровне предельной чувствительности дефектоскопа. В конструкциях с толщиной стенки менее 15 мм условная высота не определяется. Нормы оценки качества каждого типа изделий составляют с учетом особенностей информации, получаемой при ультразвуковом контроле, на основе норм Госгортехнадзора РФ и других действующих документов, определяющих качество изделия.

По результатам ультразвукового контроля составляется заключение, в котором отражены основные данные о контролируемом изделии: наименование, основные размеры, номер изделия или стыка по монтажной схеме, тип ультразвукового дефектоскопа, частота, тип преобразователя, угол его наклона и стрела, фамилия оператора, номер удостоверения. Для изделий, не удовлетворяющих техническим нормам, составляют описание обнаруженных дефектов, в котором отмечается место нахождения дефектов, их измеренные характеристики и другие характерные признаки.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные условия дефектоскопичности объекта контроля?
2. Каким образом проводят сканирование зоны контроля? Как выбирается шаг сканирования?
3. Назовите основные требования, предъявляемые к акустическому дефектоскопу.
4. Перечислите наиболее важные узлы импульсного дефектоскопа. Охарактеризуйте каждый из них.
5. Для чего предназначена схема временной регулировки чувствительности? Какие преимущества дает ее использование в процессе контроля?
6. В каких случаях необходимо использование синхронизатора? Как выбирается его рабочая частота?
7. Каковы причины появления шумов и помех? Назовите основные их виды применительно к ультразвуковому контролю.
8. Каким образом можно отличить полезный сигнал от структурных помех?
9. Укажите основные способы борьбы с помехами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном пособии рассмотрен материал по теоретическим основам акустического контроля. Основной акцент сделан на изучение наиболее распространенного в инженерной практике эхометода ультразвуковой дефектоскопии.

Учитывая тенденцию непрерывного развития научных основ технологии неразрушающего контроля, отметим основные преимущества и недостатки акустических методов контроля по сравнению с другими методами. Преимущества состоят в следующем:

- методы АК позволяют эффективно обнаруживать как поверхностные, так и объемные дефекты, в то время как другие методы контроля (за исключением радиационных) обеспечивают выявление лишь поверхностных и подповерхностных дефектов;
- радиационный контроль обеспечивает выявление внутренних дефектов, однако только методы АК позволяют эффективно выявлять наиболее опасные дефекты типа тонких трещин;
- акустические методы имеют высокую производительность, не требуют сложного оборудования и не опасны для здоровья обслуживающего персонала.

К нерешенным проблемам акустического контроля в настоящий момент следует отнести невозможность точного определения абсолютных размеров дефектов (возможны ошибки оценки размеров в 1,5–2,0 раза). Вместе с тем в последнее время в этой области достигнут значительный прогресс, а сами методы АК и их аппаратная база продолжают непрерывно развиваться.

Использование иммерсионных жидкостей и требование стабильности акустического контакта ограничивают максимальную скорость

контроля. В то же время автоматизация АК — более легкая задача, чем для радиационного или капиллярного методов.

Недостатки:

- мелкие поры и включения в материалах вызывают сильное рассеяние высокочастотных ультразвуковых волн, что ослабляет полезный сигнал и приводит к появлению шумов;
- затруднен контроль изделий сложной формы — наличие выступов и выемок на поверхности вблизи возможного расположения дефектов может привести к образованию ложных сигналов;
- грубая поверхность изделия приводит к ухудшению чувствительности и нестабильности акустического контакта преобразователя с объектом. Требования к качеству обработки поверхности особенно высоки при контактном способе контроля.

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Зацепин А. Ф. Введение в физику акустического контроля : конспект лекций / А. Ф. Зацепин. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2005. — 79 с.

Алешин Н. П. Ультразвуковая дефектоскопия : справ. пособие / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев. — Минск : Высш. шк., 1987. — 271 с.

Ермолов И. Н. Неразрушающий контроль : практ. пособие. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов ; под ред. В. В. Сухорукова. — М. : Высш. шк., 1991. — 283 с.

Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. — М. : Машиностроение, 1981. — 240 с.

Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов : справ. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. — М. : Металлургия, 1991. — 751 с.

Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении / Е. Ф. Кретов. — СПб. : Радиоавионика, 1995. — 328 с.

Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справ. : в 2 т. / под ред. В. В. Ключева. — М. : Машиностроение, 1986. — Т. 2. — 352 с.

Ермолов И. Н. Контроль ультразвуком : краткий справ. / И. Н. Ермолов. — М. : НПО ЦНИИТМАШ, 1992. — 86 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ (СПРАВОЧНОЕ)

Акустико-топографический метод — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на возбуждении в объекте контроля упругих колебаний и регистрации распределения их амплитуд на поверхности объекта.

Акустическая дефектометрия — измерение параметров дефектов, оценка их вида и ориентации в объекте контроля методами акустического неразрушающего контроля.

Акустическая дефектоскопия — акустический неразрушающий контроль наличия дефекта типа нарушения сплошности и однородности.

Акустическая ось преобразователя — линия, соединяющая точки максимальной интенсивности акустического поля в дальней зоне преобразователя и ее продолжения в ближней зоне.

Акустическая структуроскопия — определение структуры материала объекта контроля методами акустического неразрушающего контроля.

Акустическая толщинометрия — измерение толщины объекта контроля методами акустического неразрушающего контроля.

Акустический дефектоскоп — прибор акустического неразрушающего контроля, предназначенный для неразрушающего контроля наличия дефектов типа нарушения сплошности и однородности.

Акустический контакт — соединение рабочей поверхности электроакустического преобразователя с объектом контроля, обеспечивающее передачу акустической энергии между ними.

Акустический метод отражения (Reflection technique) — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на излучении акустических колебаний, отражении их от поверхности раздела двух сред и анализе параметров отраженных импульсов.

Акустический метод прохождения (Through transmission technique) — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на излучении и приеме волн, однократно прошедших через объект контроля в любом направлении, и анализе их параметров.

Акустический метод свободных колебаний — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в объекте контроля или его части и анализе параметров этих колебаний.

Акустический неразрушающий контроль (Acoustic nondestructive testing) — неразрушающий контроль, основанный на применении упругих колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте контроля. Методы, приборы и устройства акустического неразрушающего контроля, использующие ультразвуковой диапазон частот, допускается называть ультразвуковыми, например, «ультразвуковая дефектоскопия», «ультразвуковой дефектоскоп».

Акустический прибор неразрушающего контроля — акустическое средство неразрушающего контроля, состоящее из электронного блока и акустического блока или преобразователей, вспомогательных и регистрирующих устройств, использующее методы акустического неразрушающего контроля.

Акустический пьезоэлектрический преобразователь — электроакустический преобразователь, принцип работы которого основан на пьезоэлектрическом эффекте.

АРД-диаграмма — графическое изображение зависимости амплитуды отраженного или прошедшего сигнала от глубины залегания модели дефекта с учетом его размера и типа преобразователя.

Бесконтактный способ возбуждения и приема — способ возбуждения и приема упругих колебаний, не требующий непосредственного соприкосновения преобразователя с объектом контроля и применения специальных сред для создания акустического контакта.

Ближняя зона преобразователя — область акустического поля электроакустического преобразователя, в которой происходит немонотонное изменение интенсивности поля с расстоянием.

Велосимметрический акустический метод — акустический метод прохождения, основанный на анализе изменения скорости упругих волн, обусловленного наличием дефекта в объекте контроля.

Вибрационно-диагностический акустический метод — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров вибрации, возникающей при работе объекта контроля.

Временной теневой акустический метод — акустический метод прохождения, основанный на анализе увеличения времени прохождения упругих колебаний, обусловленного наличием дефекта в объекте контроля.

Дальняя зона преобразователя — область акустического поля электроакустического преобразователя, в которой происходит монотонное изменение интенсивности поля с расстоянием.

Диаграмма направленности электроакустического преобразователя — диаграмма, отображающая свойство электроакустического преобразователя излучать или принимать упругие волны в одних направлениях в большей степени, чем в других.

Диаграмма обнаружения по фронту — диаграмма, отражающая зависимость амплитуды эхосигнала от координаты линейного перемещения преобразователя в заданном направлении относительно искусственного отражателя с номинальным эффективным параметром и глубиной залегания Y .

Зеркально-теневой акустический метод — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на анализе акустических импульсов после двукратного или многократного их прохождения через объект контроля и регистрации дефектов по обусловленному ими изменению амплитуды сигнала, отраженного от донной поверхности.

Зондирующий импульс — акустический импульс, излучаемый электроакустическим преобразователем в направлении объекта контроля.

Иммерсионный способ акустического контакта — акустический контакт через слой жидкости толщиной больше пространственной длительности акустического импульса для импульсного излучения или нескольких длин волн для непрерывного излучения.

Импедансный акустический метод — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на возбуждении в объекте контроля упругих колебаний и анализе изменения механического импеданса участка поверхности этого объекта.

Контактная гибкость — гибкость зоны соприкосновения преобразователя с объектом контроля при сухом точечном акустическом контакте.

Контактный способ акустического контакта — акустический контакт через слой вещества толщиной менее половины длины волны.

Коэффициент преобразования преобразователя — величина, равная модулю передаточной функции электроакустического преобразователя на частоте максимума преобразования.

Лучевая разрешающая способность акустического дефектоскопа — способность акустического дефектоскопа разделять два дефекта, расположенных по акустической оси электроакустического преобразователя или вблизи нее на близких глубинах залегания искусственного отражателя.

Максимальная пороговая чувствительность акустического дефектоскопа — пороговая чувствительность акустического дефектоскопа при максимальной чувствительности приемника и мощности генератора и заданном отношении сигнал-помеха.

Метод акустоупругости — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на измерении скорости распространения упругих колебаний, зависящей от физико-механических свойств или напряженно-деформированного состояния.

Передаточная функция электроакустического преобразователя — отношение сигнала на выходе электроакустического преобразователя, нагруженного на определенную нагрузку, к сигналу на его входе.

Поверхность ввода — поверхность объекта контроля, через которую вводятся упругие колебания.

Полоса пропускания электроакустического преобразователя — интервал частот, включающий в себя частоту максимума преобразования преобразователя, в котором амплитудно-частотная характеристика электроакустического преобразователя принимает значения в режиме приема и излучения на уровне минус 3 дБ, в режиме двойного преобразования — минус 6 дБ.

Пороговая чувствительность акустического дефектоскопа — наименьшее или наибольшее значение параметра объекта контроля или стандартного образца, которое может быть зарегистрировано акустическим дефектоскопом при установленных условиях.

Преобразователь акустического прибора неразрушающего контроля — часть акустического прибора неразрушающего контроля, состоящая из излучающего и (или) приемного устройства, предназначенная для выработки электрических сигналов измерительной информации.

Рабочая поверхность электроакустического преобразователя — поверхность электроакустического преобразователя, через которую излучаются и (или) принимаются упругие колебания.

Реверберационный акустический метод (Reverberation technique) — акустический метод отражения, основанный на анализе времени объемной реверберации в объекте контроля.

Резонансный акустический метод (Resonance technique) — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на возбуждении вынужденных упругих колебаний в объекте контроля или его части и анализе параметров колебаний системы объект контроля — преобразователь при резонансах или вблизи них.

Стандартная акустическая нагрузка — стандартный образец в виде твердой, жидкой или газообразной среды или специальное устройство, с которым находится в контакте рабочая поверхность преобразователя при измерении его характеристик, обладающий определенными акустическими и геометрическими параметрами.

Стандартный образец для средств акустического неразрушающего контроля — средство измерения в виде твердого тела, предназначенное для хранения и воспроизведения значений физических величин, принятых в качестве единиц для измерения метрологических характеристик, отражающих показатели качества продукции в соответствии с назначением средств акустического неразрушающего контроля и физическими особенностями реализуемых ими методов.

Стрела преобразователя — расстояние от точки выхода наклонного преобразователя до его передней грани.

Струйный способ акустического контакта — акустический контакт через струю жидкости, создаваемую между преобразователем и объектом контроля.

Сухой акустический контакт — акустический контакт без дополнительных смачивающих материалов.

Теневой акустический метод — акустический метод прохождения, основанный на анализе уменьшения амплитуды прошедшей волны, обусловленного наличием дефекта.

Точка ввода — точка пересечения акустической оси электроакустического преобразователя с поверхностью объекта контроля.

Угол ввода преобразователя (Angle of incident) — угол между нормалью к поверхности ввода и акустической осью преобразователя, измеренный в плоскости, перпендикулярной к рабочей поверхности преобразователя и проходящей через его акустическую ось.

Условная лучевая разрешающая способность акустического дефектоскопа — лучевая разрешающая способность, определяемая длительностью эхосигнала на уровне 0,5 от его максимального значения, полученного от искусственного отражателя с номинальным эффективным параметром.

Условная фронтальная разрешающая способность акустического дефектоскопа — фронтальная разрешающая способность, определяемая шириной диаграммы обнаружения по фронту на уровне 0,5 от ее максимального значения.

Фронтальная разрешающая способность акустического дефектоскопа — способность акустического дефектоскопа разделять два дефекта, расположенных близко друг к другу на одной глубине залегания искусственного отражателя.

Частота акустического прибора — частота заполнения сигнала прибора акустического неразрушающего контроля, если его форма имеет вид радиоимпульса.

Чувствительность приемника акустического прибора неразрушающего контроля — наименьшее значение амплитуды электрического сигнала на входе приемника акустического прибора неразрушающего контроля, обеспечивающее при установленных условиях заданный уровень амплитуды выходного сигнала на индикаторе.

Ширина диаграммы направленности преобразователя — область диаграммы направленности электроакустического преобразователя в режиме излучения и (или) приема на уровне минус 3 дБ, в режиме двойного преобразования — минус 6 дБ.

Шумодиагностический акустический метод — метод акустического неразрушающего контроля, основанный на анализе акустических шумов, возникающих при работе объекта контроля.

Щелевой способ акустического контакта — акустический контакт через слой жидкости толщиной порядка длины волны.

Электроакустический преобразователь — часть преобразователя акустического прибора неразрушающего контроля, принцип работы которого основан на преобразовании электрической энергии в акустическую и обратно в процессе излучения и (или) приема упругих колебаний.

Эхозеркальный акустический метод — акустический метод отражения, основанный на анализе параметров акустических импульсов, отраженных от дефекта и донной поверхности объекта контроля.

Эхоимпульсный акустический метод (Echotechnique) — акустический метод отражения, основанный на анализе параметров акустических импульсов, отраженных от дефектов и поверхностей объекта контроля.

ОГЛАВЛЕНИЕ

.....

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ.....	5
1.1. Классификационная система	5
1.2. Методы прохождения.....	8
1.2.1. Амплитудный теневой метод	8
1.2.2. Временной теневой метод	10
1.2.3. Велосиметрический метод.....	11
1.3. Методы отражения	12
1.3.1. Эхометод	12
1.3.2. Эхозеркальный метод	13
1.3.3. Дельта-метод	15
1.3.4. Реверберационный метод.....	16
1.4. Импедансный метод.....	17
1.5. Метод свободных колебаний	18
1.6. Резонансный метод	20
1.7. Комбинированные методы	21
1.7.1. Зеркально-теневой метод	21
1.7.2. Эхотеневой метод.....	22
1.7.3. Эхосквозной метод	23
1.8. Пассивные методы АК.....	25
1.8.1. Акустико-эмиссионный метод.....	25
1.8.2. Вибро- и шумодиагностика.....	27
1.9. Способы осуществления акустического контакта.....	27

1.10. Преимущества и недостатки АК.....	29
Контрольные вопросы.....	31
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	
АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ.....	32
2.1. Колебания и волны	32
2.2. Волновой фронт. Плоские, сферические и цилиндрические волны	37
2.3. Упругие характеристики среды	40
2.4. Фазовая и групповая скорости. Дисперсия скорости.....	45
2.5. Энергетические характеристики упругих волн	48
2.6. Акустические свойства сред.....	51
2.6.1. Скорость звука	51
2.6.2. Акустический импеданс	52
2.6.3. Затухание УЗК	53
Контрольные вопросы.....	58
3. УПРУГИЕ ВОЛНЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ.....	59
3.1. Поверхностная волна Рэлея.....	59
3.2. Головные волны	62
3.3. Нормальные волны	64
3.3.1. Волны Лэмба	64
3.3.2. Волны в стержнях (волны Порхгаммера)	70
Контрольные вопросы.....	73
4. ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ СРЕД.....	74
4.1. Коэффициенты отражения и прохождения	74
4.2. Обобщенный закон Снеллиуса.....	77
4.3. Критические углы	79
4.4. Прохождение волн через границу раздела сред	81
4.4.1. Прохождение акустической волны через границу жидкость — жидкость	81
4.4.2. Энергетические соотношения на границе жидкость — жидкость и твердое тело — твердое тело.....	84
4.5. Угловая зависимость коэффициентов прозрачности	85
4.6. Отражение акустической волны от свободной поверхности твердого тела	87
4.7. Явление незеркального отражения	89

4.8. Отражение от двугранного угла	92
4.9. Прохождение волн через тонкий слой на границе раздела двух сред	93
4.10. Влияние толщины слоя на прохождение акустических волн	97
Контрольные вопросы.....	99
5. ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА.....	101
5.1. Пьезоэлектрический эффект	102
5.2. Пьезоэлектрические материалы и их свойства	106
5.3. Классификация пьезопреобразователей	108
5.4. Конструкция преобразователей	109
5.5. Обозначение пьезопреобразователей.....	118
5.6. Передаточная функция преобразователя.....	119
5.7. Эквивалентные схемы пьезоизлучателей и приемников.....	121
5.8. Рациональный выбор параметров преобразователя	124
5.9. Бесконтактные способы излучения и приема акустических волн	130
Контрольные вопросы.....	139
6. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.....	140
6.1. Поле преобразователя произвольной формы	141
6.2. Поле дискового преобразователя	143
6.3. Диаграмма направленности.....	146
6.4. Поле кольцеобразного преобразователя	149
6.5. Поле прямоугольного преобразователя	149
6.6. Поле преобразователя с акустической задержкой.....	152
Контрольные вопросы.....	157
7. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ	159
7.1. Модели дефектов.....	160
7.2. Расчет акустического тракта для случая прямого преобразователя	161
7.3. Расчет акустического тракта для случая наклонного преобразователя.....	164
7.4. Стандартные образцы (СО)	167

7.5. Эквивалентный размер дефекта	171
7.6. АРД-диаграмма	172
Контрольные вопросы.....	174
8. АППАРАТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	176
8.1. Ультразвуковой дефектоскоп	176
8.2. Шумы и помехи при ультразвуковом контроле	186
8.3. Причины возникновения и способы подавления ложных сигналов	188
8.4. Процедура контроля.....	194
Контрольные вопросы.....	195
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	196
РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ (СПРАВОЧНОЕ)	199

Учебное издание

Зацепин Анатолий Федорович

Акустический контроль

Редактор *И. В. Меркурьева*

Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 21.09.2016. Формат 70×100 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 17,1.
Уч.-изд. л. 10,6. Тираж 75 экз. Заказ 227.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

Для заметок



ЗАЦЕПИН АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физические методы и приборы контроля качества» физико-технологического института Уральского федерального университета. Автор более 450 научных публикаций, 35 изобретений, 22 учебно-методических изданий, в том числе 10 учебных пособий.

Член редколлегии журнала «Nondestructive Testing». Почетный работник высшего образования РФ. Лауреат премии Дж. Сороса за вклад в науку и научное образование университетского уровня.